

УДК 621.577

UDC 621.577

**КОМПРЕССИОННЫЕ ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ  
В СИСТЕМАХ ОТОПЛЕНИЯ****COMPRESSION THERMAL PUMPS IN  
HEATING SYSTEMS**Шинкевич Татьяна Олеговна  
к.т.н.Shinkevich Tatyana Olegovna  
Cand.Tech.Sci.Попкова Оксана Сергеевна  
к.т.н.Popkova Oksana Sergeevna  
Cand.Tech.Sci.Шинкевич Олег Петрович  
к.т.н., доцент  
*Казанский государственный энергетический  
университет, Казань, Россия*Shinkevich Oleg Petrovich  
Cand.Tech.Sci., associate professor  
*Kazan State Energy University, Kazan, Russia*

В статье рассмотрена возможность теплоснабжения ЖКХ с использованием тепловых насосов. Показана область, в которой тепловой насос наиболее целесообразно использовать для систем теплоснабжения

In this article, a possibility of a heat supply of housing and communal services with use of thermal pumps is considered. The area, in which thermal pump is the most expedient way to use for heat supply systems is shown

Ключевые слова: ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ,  
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ТЕПЛОВОЙ НАСОС

Keywords: ENERGY SAVING, HEATING,  
THERMAL PUMP

Преимущественно в мире (> 95 %) в системах теплоснабжения используются парокompрессионные ТН (тепловые насосы)[1]. Рабочий цикл парокompрессионного ТН иллюстрирует рис. 1.

Перегретые пары агента засасываются из испарителя «И» компрессором «КМ», несколько нагреваются в промежуточном теплообменнике «ТО» и поступают в конденсатор «КД».

Далее жидкий агент, отдав некоторое количество теплоты парообразному хладагенту в промежуточном теплообменнике «ТО», проходит через регулирующий вентиль «РВ», хладагент направляется в испаритель «И».

Теплота от низкопотенциального (НПИ) источника поступает в испаритель (И) ТН, где отдает свою теплоту рабочему телу, например фреону. Образовавшийся пар фреона при сжатии в компрессоре нагревается до 80 – 95 °С и поступает в конденсатор (К), где, конденсируясь, отдает свое тепло в систему отопления. Охлажденный жидкий фреон поступает в дроссель, где дросселируется до давления, при котором фреон переходит в парообразное состояние при температуре НПИ, и цикл повторяется.

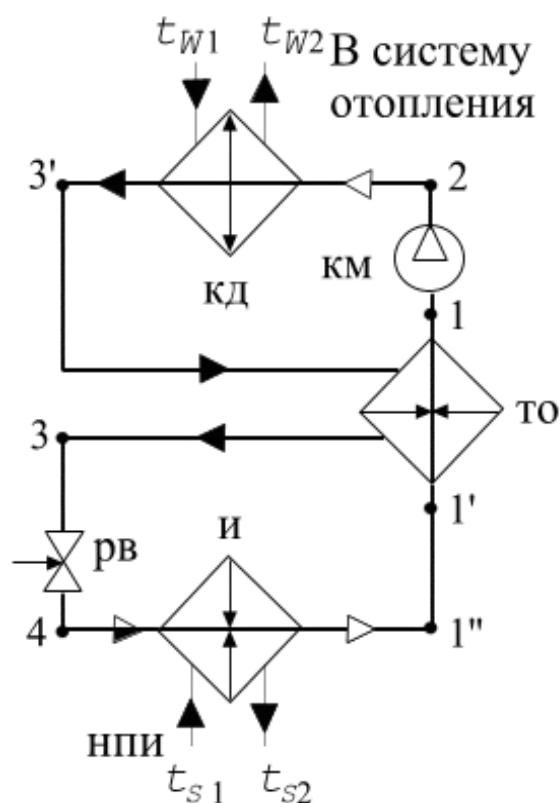


Рис. 1 Расчетная схема фреонового компрессионного ТН.

И – испаритель; КМ – компрессор; КД – конденсатор; РВ – регулирующий вентиль; ТО – промежуточный теплообменник.

$t_{w1}$  – температура воды на входе в конденсатор;  $t_{w2}$  – температура воды на выходе из конденсатора;  $t_{s1}$  – температура воды на входе в испаритель;  $t_{s2}$  – температура воды на выходе из испарителя.

В расчете на единицу тепла  $Q_T$  исходного топлива ТЭС или котельная производят мощность  $N_e = Q_T \cdot \eta$  кВт, где  $\eta$  – КПД ТЭС или котельной. Если эта мощность будет затрачена на привод ТН, то он отберет от НПИ тепло  $Q_{нпи}$  и передаст потребителю при необходимой ему температуре количество тепла  $Q_{пт} = N_e \cdot \phi$ , где  $\phi$  – коэффициент преобразования ТН. В результате потребитель получит тепло в количестве, кВт:

$$Q_{\text{пт}} = Q_{\text{т}} \cdot \eta \cdot \varphi \quad (1)$$

Из формулы (1) видно, что если произведение  $\eta \cdot \varphi > 1$ , то  $Q_{\text{пт}} > Q_{\text{т}}$ .

Поскольку КПД современных ТЭС не ниже 35 %, а котельных ~ 75 %, при этом коэффициент преобразования ТН, как правило, не ниже 3, то в худшем случае  $Q_{\text{пт}} = 1,05 - 2,25 Q_{\text{т}}$ . В большинстве случаев независимо от типа ТН и типа привода компрессора на единицу затраченного исходного топлива потребитель получает в 1,2–2,8 раза больше теплоты, чем при прямом сжигании этой единицы исходного топлива. Это достигается тем, что ТН вовлекает в полезное использование тепло НПИ источника  $Q_{\text{нпи}}$  естественного происхождения (теплота грунта, грунтовых вод, природных водоемов, солнечная энергия) или техногенного происхождения (промышленные стоки, очистные сооружения, тепло вентиляционных выбросов и т.п.) с температурой от +3 до +40°C, т.е. такое тепло, которое не может быть напрямую использовано для теплоснабжения.

Коэффициент преобразования ТН определяется формулой

$$\varphi = Q_{\text{пт}} / N_{\text{е}} = 1 + Q_{\text{нпи}} / N_{\text{е}} \quad (2)$$

Полученное выражение является определением коэффициента преобразования ТН, и, соответственно, оно применимо во всех случаях.

Все это предопределило быстрое развитие теплонасосного теплоснабжения в мире. Вообще, теплонасосное теплоснабжение из всех видов нетрадиционной энергетики является наиболее быстро развивающейся отраслью, и в некоторых развитых странах оно уже является главным конкурентом традиционной теплоэнергетики, основанной на сжигании органического топлива. В соответствии с прогнозами Мирового энергетического комитета (МИРЭК) к 2020 г. в развитых странах 75 % тепла для отопления и горячего водоснабжения будет поступать от тепловых насосов.

Швеция – безусловный мировой лидер в практическом использовании тепловых насосов – уже сейчас около 60 % необходимого для теплоснабжения тепла получает от теплонасосных установок. Причем применение ТН в Швеции стало настолько массовым, прежде всего по экономическим соображениям, что когда в 1985 г. в стране был проведен опрос населения на тему «Какое из видов отопления жители страны предпочитают?», то 95 % опрошенных ответили – теплонасосное. В Швеции работают две самые мощные ТНС на 320 и 200 МВт; обе на низкопотенциальном тепле Балтийского моря, температура воды которого в отопительный период составляет всего 5 – 6 °С. И в других развитых странах – США, Швейцарии, Японии, Франции и т.д. – развитие теплонасосного теплоснабжения подтверждает прогнозы МИРЭК.

В 1972 г., когда лаборатория натуральных испытаний Института теплофизики СО АН СССР запускала на Камчатке первую в России теплонасосную станцию и, когда словосочетание «тепловой насос» было малоизвестно, в мире тогда работало всего около 100 000 штук ТН, в основном малой мощности (10...20 кВт), сейчас уже работают около 40 млн. штук [2].

Практически неисчерпаемым источником дешевой тепловой энергии является тепло канализационных стоков. Температура хозяйственно-бытовых канализационных стоков колеблется в пределах 15 – 25 °С и даже в самый холодный период года не опускается ниже 10 °С. С канализационными стоками в природу сбрасывается огромное количество тепла. Эта тепловая энергия на данный момент никак не используется.

На канализационно-насосной станции «Коммунальное теплоснабжение Краматорска» (данные станции) неочищенные хозяйственно-бытовые стоки, поступающие по канализационным коллекторам, собираются в подземном приемном резервуаре, после чего перекачиваются на очистные сооружения с помощью фекальных насосов.

Неочищенные сточные воды, имеющие температуру около 20 °С, из приемного резервуара фекальными насосами подаются в теплообменник-утилизатор, где отдают теплоту промежуточному теплоносителю (воде), охлаждаясь до температуры 12 – 14 °С, после чего по трубопроводу возвращаются в резервуар. В теплообменнике–утилизаторе предусмотрены специальные щетки, которые периодически очищают теплообменные поверхности со стороны фекальных вод. Станция перекачки канализационных стоков в г. Краматорске находится на расстоянии 70 метров от действующей котельной, в которой планируется разместить теплонасосное оборудование.

Для сглаживания неравномерности потребления горячей воды и уменьшения единичной мощности оборудования рядом с котельной установлены баки-аккумуляторы горячей воды (два теплоизолированных бака объемом 5 м<sup>3</sup> каждый). На канализационно-насосной станции неочищенные хозяйственно–бытовые стоки, поступающие по канализационным коллекторам, собираются в подземном приемном резервуаре, после чего перекачиваются на очистные сооружения с помощью фекальных насосов. Неочищенные сточные воды, имеющие температуру около 20 °С, из приемного резервуара фекальными насосами подаются в теплообменник-утилизатор, где отдают теплоту промежуточному теплоносителю (воде), охлаждаясь до температуры 12 – 14 °С, после чего по трубопроводу возвращаются в резервуар. Нагретый в теплообменнике-утилизаторе до 10 – 12 °С промежуточный теплоноситель подается в испаритель теплового насоса, где охлаждается до температуры 8 °С, отдавая теплоту хладону парокомпрессионного контура, и вновь направляется в теплообменник-утилизатор. Образующиеся в испарителе пары хладона сжимаются в компрессоре и конденсируются при высокой температуре, нагревая проходящую через конденсатор сетевую воду.

Подобная теплонасосная установка мощностью 2000 кВт, работающая с использованием теплоты канализационных стоков и предназначенная для подогрева водопроводной воды перед котлами районной тепловой станции, была введена в эксплуатацию в г. Зеленограде в 2004 году (ж. АВОК, №5 2004г). Испытания показали высокую эффективность установки. В процессе первого цикла испытаний была достигнута экономия энергии 65 %. Авторы отмечают, что планируется достичь 75 % экономии энергии.

Впервые в Японии, в районе Koraku 1-chome в Токио, для теплоснабжения района установлена система теплоснабжения, использующая тепло необработанных сточных вод. Как ожидается, использование тепла сточных вод уменьшит потребление энергии и выброс парниковых газов. Применение этой системы уменьшает потребление энергии на 20 %, выброс  $\text{CO}_2$  и  $\text{NO}_x$  на 40 и 37 % соответственно.

Сточные воды уже использовались в других проектах как источник низкопотенциального тепла для тепловых насосов. Однако проект в Токийском районе Koraku 1-chome уникален тем, что впервые в Японии используются неочищенные, необработанные сточные воды. Это позволяет использовать тепловые насосы не только на очистных станциях, но и на станциях перекачки и канализационных сетях.

На станции в Токийском районе Koraku 1-chome смонтированы 3 тепловых насоса, 2 с охлаждающей способностью 10,5 МВт и нагревающей способностью 12,8 МВт каждый и 1 тепловой насос с охлаждающей способностью 3,9 МВт и нагревающей – 5 МВт. Этот насос используется периодически, когда возникает необходимость подачи горячей и холодной воды одновременно. Расход сточных вод, проходящих через станцию, составляет до  $129\,600\text{ м}^3$  в день. Станция охлаждает воду до  $+7\text{ }^\circ\text{C}$  и нагревает до  $+47\text{ }^\circ\text{C}$  и обеспечивает этой водой здание общей

площадью 126 400 м<sup>2</sup>, подавая ее через тепловую сеть, выполненную по 4-трубной схеме, проложенную под землей на глубине 7 – 8 м.

Очищаются трубы теплообменника установленными внутри щетками. Для выравнивания тепловой нагрузки и использования недорогого ночного электричества на станции установлены баки-аккумуляторы общим объемом 1 520 м<sup>3</sup>.

В настоящей работе анализируются условия применимости для систем теплоснабжения (отопления и горячего водоснабжения) от НПИ в виде сточных канализационных неочищенных вод в условиях городов и поселков Республики Татарстан (РФ) в сравнении с газовой котельной малой и средней теплопроизводительности, а также с ТЭЦ.

Использовалась стандартная методика расчета парокомпрессионной теплонасосной установки на фреоне R 22 [3].

Рассчитывалась тепловая нагрузка на ТН условной мощностью 20000 кВт для обеспечения отопления потребителей при помощи радиаторов с температурой теплоносителя ~ 80 °С. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры ТН для покрытия тепловой нагрузки в 20000 кВт

№ п\п	$t_k$ °С	$t_o$ °С	$p_k$ МПа	$p_o$ МПа	$q_o$ кДж/кг	$l_T$ кДж/кг	$M_T$ кг/с	$N_T$ кВт	$N_i$ кВт	$N_e$ кВт	$Q_{кд}$ кВт	$\Phi$
1	85	5	4,04	0,58	104	57	192	1096 1	13701	15223	35224	2,3
2	85	10	4,04	0,68	102	50	196	9805	12256	13618	32256	2,4
3	85	15	4,04	0,79	96	44	208	9167	11458	12731	32732	2,8 6
4	85	20	4,04	0,91	92	38	217	8261	10326	11474	30326	2,9

В табл. 1 приведены следующие параметры:  $t_k$  – температура фреона в конденсаторе;  $t_o$  – температура фреона в испарителе;  $q_o$  – теплопроизводительность фреона;  $l_T$  – удельная работа сжатия в компрессоре;  $M_T$  –

массовый расход циркулирующего агента, требуемый для отвода теплопритоков;  $N_T$  – адиабатическая мощность сжатия в компрессоре;  $N_i$  – действительная (индикаторная) мощность сжатия;  $N_e$  – мощность на валу компрессора (эффективная мощность);  $Q_{кд}$  – тепловой поток на конденсатор;  $\varphi$  – коэффициент преобразования ТН.

Далее рассчитывалась тепловая нагрузка на ТН условной мощностью 20000 кВт для обеспечения отопления потребителей при помощи панельно-лучистого отопления (плоскими панелями), которые требуют температуру теплоносителя  $\sim 40$  °С . Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Параметры ТН для покрытия тепловой нагрузки в 20000 кВт

№ п\п	$t_k$ °С	$t_o$ °С	$p_k$ МПа	$p_o$ МПа	$q_o$ кДж/ кг	$l_T$ кДж/кг	$M_T$ кг/с	$N_T$ кВт	$N_i$ кВт	$N_e$ кВт	$Q_{кд}$ кВт	$\varphi$
1	40	5	1,534	0,58	179	26	112	2905	3631	4035	24035	6,62
2	40	15	1,534	0,68	172	17	115,6	1965	2656,6	2729,6	22729	9,25
3	40	20	1,534	0,79	164	13	122	1585	1982	2202	22202	11,2

Для обоснования целесообразности применения ТН в системе теплоснабжения с тепловой нагрузкой 20000 кВт (17,2 Гкал/ч) в данной работе проведена экономическая оценка. Расчет проводился на количество теплоты (от котельной, ТЭЦ) или электрической энергии (имеются в виду электродвигатели компрессора), полученных потребителем в течение одного часа.

В расчетах учтены только производственные затраты в ТН и расценки единицы теплоты от районной котельной, ТЭЦ и электрической энергии в ЖКХ в 2009 году.

Производственные затраты при работе ТНУ рассчитывались из следующих соображений:

- стоимость одного кВт·часа принята  $c_s = 2,25$  руб;



- весь расчет производится на работу установки в течение одного часа.

Расчет стоимости отопления с радиаторами от ТН ( $t_k = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Затраты  $z_i$  на эксплуатацию для обеспечения потребляемой тепловой нагрузки в количестве 20000 кВт составит:

при температуре сточных вод  $10 \text{ }^\circ\text{C}$

$$z_1 = N_{el} \cdot C_3 = 15223 \cdot 2,25 = 34252 \text{ руб.}$$

при температуре сточных вод  $15 \text{ }^\circ\text{C}$

$$z_2 = 13618 \cdot 2,25 = 30640,5 \text{ руб}$$

при температуре сточных вод  $20 \text{ }^\circ\text{C}$

$$z_3 = 12731 \cdot 2,25 = 28645 \text{ руб}$$

при температуре сточных вод  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

$$z_4 = 11474 \cdot 2,25 = 25816,5 \text{ руб.}$$

Расчет стоимости производственных затрат панельно-лучистого отопления от ТН ( $t_k = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Затраты на эксплуатацию для обеспечения потребляемой тепловой нагрузки в количестве 20000 кВт составит:

при температуре сточных вод  $10 \text{ }^\circ\text{C}$

$$z_{1'} = 4035 \cdot 2,25 = 9078,75 \text{ руб.}$$

при температуре сточных вод  $15 \text{ }^\circ\text{C}$

$$z_{2'} = 2729,6 \cdot 2,25 = 6141,6 \text{ руб.}$$

при температуре сточных вод  $20 \text{ }^\circ\text{C}$

$$z_{3'} = 2202 \cdot 2,25 = 4954,5 \text{ руб.}$$

1. Отопление от газовых котлов.

По данным министерства энергетики РФ стоимость 1 Гкал/час в зависимости от местоположения котельной – город или сельская местность – колеблется в пределах 900 - 1200 руб. Для сравнения примем стоимость 1 Гкал/час – 1200 руб. Так как потребная тепловая нагрузка составляет

17,2 Гкал/ч (20000 кВт), то в течение 1 часа потребители должны оплатить  $Z_{кот} = 17,2 \cdot 1200 = 20640$  руб.

### 3. Отопление от ТЭЦ.

По данным министерства энергетики РФ стоимость 1 Гкал/час тепловой энергии составляет ~ 500 руб. Таким образом, потребляемая в течение 1 часа тепловая нагрузка будет стоить  $17,2 \cdot 500 = 8600$  руб.

Полученные данные сравниваем с данными для источников с газовыми отопительными котлами и централизованной системой отопления от ТЭЦ.

Расчетные данные сведены в табл. 3 и в виде графических зависимостей представлены на рис. 2.

Таблица 3 – Стоимость производственных затрат теплоты от различных источников при потреблении 20000 кВт за 1 час

Тепловой насос, $Z_i$ , руб.			Котельная, $Z_i$ руб.	ТЭЦ, $Z_i$ , руб.
$t_o$ °C	$t_k = 80$ °C	$t_k = 40$ °C		
5	34252	–	20640	8600
10	30640,5	–		
15	28645	–		
20	25816,5	–		
5	–	9078,75		
15	–	6141,6		
20	–	4954,5		

Расчеты показали, что при использовании ТН в системах отопления, где в качестве отопительного прибора используются радиаторы при температуре теплоносителя в них  $t_{w2} \sim 80$  °C и температурой воды в канализационных стоках в пределах  $t_{s1} = 10 - 25$  °C, коэффициент преобразования  $\phi = 2,5 - 3$ . В том случае, если использовать панельно-лучистый способ отопления помещения с температурой воды в панелях

$t_{w2} \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$  при тех же температурах воды в канализационных стоках, коэффициент преобразования ТН  $\phi = 6 - 11$ .

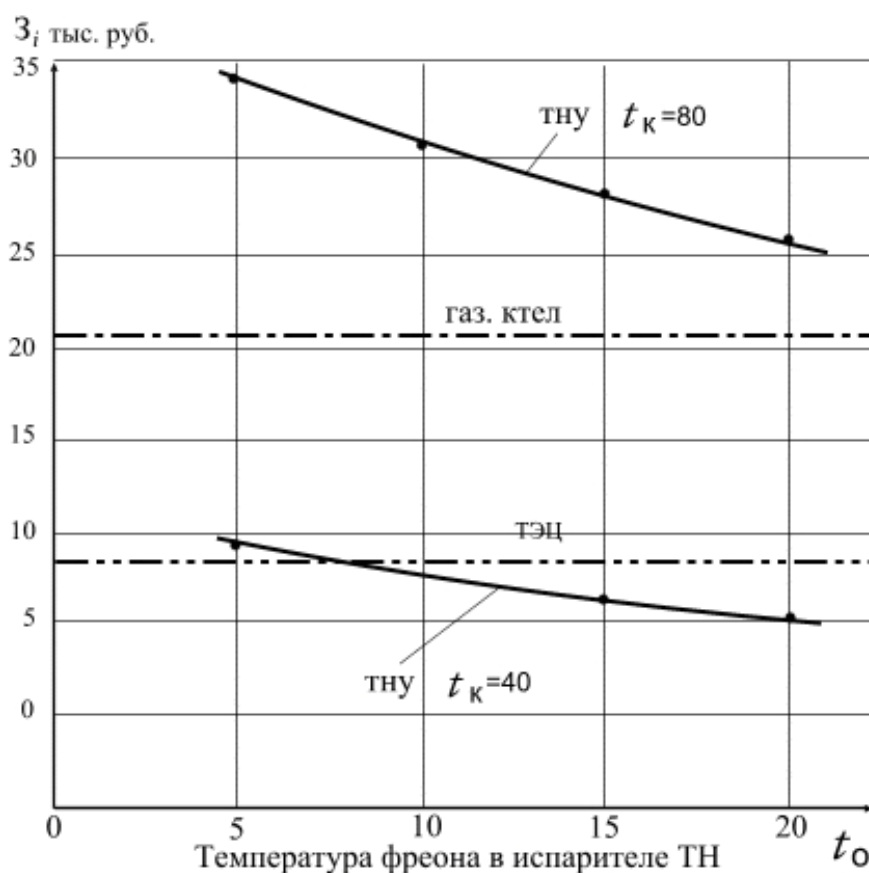


Рис. 2. Зависимость производственных затрат на эксплуатацию различных источников для систем отопления на 20000 кВт потребленной теплоты от температуры НПИ

Анализируя графические зависимости представленные на рис. 2, можно отметить, что с ростом температуры фреона (температуры НПИ) в испарителе от 5 до 20 °C ТН стоимость производственных затрат в случае использования традиционного способа (радиаторного) отопления помещений уменьшается с 30 тыс. руб. за 20000 кВт·час потребленной теплоты в системе теплоснабжения для ТН до 25 тыс. руб. При этом затраты потребителя на закупку теплоты в условиях Республики Татарстан от газовой котельной составляют ~ 21 тыс. руб. и от ТЭЦ – ~ 8,5 тыс. руб.

Таким образом, отопление от ТН с использованием сточных канализационных вод в качестве НПИ не может конкурировать с котельными и, тем более, с ТЭЦ.

Экономическая ситуация резко меняется, если использовать панельно-лучистое отопление помещений. Стоимость теплоты величиной 20000 кВт·час отпущенной потребителю в течение одного часа почти в два раза ниже, чем от газовой котельной, и соизмерима с теплотой от ТЭЦ.

Следует иметь в виду, что с учетом капитальных затрат (на покупку и ввод в эксплуатацию ТНУ) стоимость одноступенчатой установки может быть значительной. По данным ЗАО «Энергия» стоимость 1 Гкал/ч расчетной тепловой мощности составит ~\$1000 США (31000 руб.). В данных исследованиях не ставилась задача расчета времени окупаемости установленных ТНУ, газовых котлов, электрических котлов.

#### **Список литературы**

1. Сергеев Т. Тепловые насосы в России // Аква-Терм. 2005. N 2(24). С 40, 42.
2. Бутузов В.А. Перспективы применения тепловых насосов // Промышленная энергетика. 2005. № 10. С 8-15.
3. Холодильные машины. Справочник/ Под ред. А. В. Быкова. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. 221 с.