

## К РАСЧЕТУ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

А.Г. Цубанов, канд. техн. наук, доцент, А.Л. Синяков, канд. техн. наук, доцент,  
И.А. Цубанов, ст. преподаватель (БГАТУ)

### Аннотация

*Предложена методика расчета и анализа энергоэффективности применения теплонасосных установок (ТНУ) в системах теплоснабжения. На основе предложенной методики выполнен расчет и анализ энергоэффективности использования ТНУ в системах горячего водоснабжения.*

*The procedure of calculation and analysis of power efficiency while using the heat pump systems in heat supply systems is suggested. On the basis of the offered technique, the calculation and analysis of power efficiency are given for the heat pump system usage in hot-water transmission lines.*

### Введение

В условиях ограниченности топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) повышение эффективности их применения приобретает особую значимость. Экономия и бережливость в области производства и использования энергии являются приоритетными направлениями государственной энергетической политики.

В Республике Беларусь достигнуты весомые результаты при решении задач энергосбережения. За последние 15 лет энергоемкость ВВП уменьшилась более чем в 2,8 раза [1].

В настоящее время эффективные энергосберегающие мероприятия, не требовавшие значительных затрат, в большинстве своем уже нашли практическое внедрение, и для дальнейшего повышения энергоэффективности систем теплоснабжения требуются все большие капитальные вложения и реализация методов и приемов, не относившихся ранее к конкурентоспособным.

Особое внимание уделяется вопросу энергосбережения путем использования низкопотенциальной теплоты окружающей среды с целью замещения традиционно используемых ТЭР. В связи с этим все более широкое применение в системах теплоснабжения находят ТНУ, способные преобразовывать низкопотенциальную теплоту окружающей среды в теплоту более высокого температурного потенциала, пригодную для теплоснабжения.

Достоинства и преимущества ТНУ, а также проблемы, связанные с их внедрением, изложены в работах [2-4].

Рекомендации по применению ТНУ при отоплении, вентиляции и горячем водоснабжении усадебных жилых домов даны в ТКП 45-4.02-74.

Экономический эффект от использования ТНУ при теплоснабжении потребителей во многом зависит

от стоимости топлива и тарифов на тепловую и электрическую энергию, а также от капитальных затрат на сооружение ТНУ.

Однако стоимость топлива и тарифы на энергию по ряду причин не в полной мере отражают действительные затраты на производство электрической и тепловой энергии и не всегда могут быть объективными показателями реальной стоимости топлива и энергии. В связи с этим, рассматривая технические решения задач энергосбережения, используют в качестве показателя энергоэффективности, как правило, ожидаемое снижение расхода топлива.

Наибольшее распространение нашли ТНУ с электроприводом компрессора. При расчете их энергоэффективности сопоставляют расходы топлива, с одной стороны, в котельных установках систем теплоснабжения, а с другой – на тепловых электростанциях (ТЭС) при производстве электрической энергии, потребляемой электроприводом компрессора ТНУ.

Энергоэффективность работы ТНУ определяется коэффициентом преобразования как отношением полезного энергетического эффекта (теплоты, передаваемой тепловым потребителям) к затраченной при этом электрической (механической) энергии. Для ТНУ с электроприводом компрессора коэффициент преобразования равен отношению теплопроизводительности ТНУ к мощности электропривода.

Достоверность технико-экономических расчетов при использовании ТНУ в системах теплоснабжения во многом зависит от того, насколько обоснованно приняты значения коэффициентов преобразования тепловых насосов (ТН) с учетом температурных условий работы ТНУ.

Цель данных исследований состоит в анализе опубликованных данных по определению коэффициента преобразования, разработке методики расчета и

анализа энергоэффективности применения ТНУ в системах теплоснабжения, а также в выполнении расчета и анализа энергоэффективности использования ТНУ в системах горячего водоснабжения.

### Основная часть

При анализе применения ТНУ в системах теплоснабжения, необходимо, прежде всего, остановиться на расчете коэффициента преобразования теплового насоса.

В ряде опубликованных работ достаточно произвольно принимаются значения коэффициента преобразования, без учета его взаимосвязи, как с температурой источника теплоты низкого потенциала (ИТНП), используемого для обеспечения работы ТНУ, так и с температурой источника теплоты высокого потенциала (ИТВП), предназначенного для теплоснабжения тепловых потребителей [4-6].

Коэффициент преобразования ориентировочно рассчитывают, используя степень совершенства реального термодинамического цикла ТН как степень его приближения к обратному циклу Карно [4, 7-11].

В работе [4] рекомендуется принимать степень совершенства реального цикла ТН равной 0,6, а в работах [8-10] – 0,7 или 0,8. Последние значения являются явно завышенными, так как нельзя ожидать столь высокую степень приближения реального термодинамического цикла к обратному циклу Карно.

По данным работ [7, 11], степень совершенства реального цикла находится в пределах от 0,3 до 0,65 в зависимости от тепловой мощности (теплопроизводительности) ТН и конструктивных особенностей компрессора.

Очевиден существенный разброс в рекомендуемых значениях степени совершенства реального термодинамического цикла ТН.

Для решения вопроса о размере степени совершенства цикла был выполнен ее расчет по обобщенной полуэмпирической формуле В.С. Мартыновского [11], предложенной для определения коэффициента преобразования ТН.

Было установлено, что степень совершенства реального цикла ТН зависит от коэффициента преобразования обратного цикла Карно (табл. 1).

**Таблица 1. Степень совершенства реального цикла  $\eta$**

$\mu_k$	5	6	7,5	10	12,5	15
$\eta$	0,465	0,505	0,55	0,595	0,62	0,64

В таблице использовано обозначение  $\mu_k$  – коэффициент преобразования обратного цикла Карно.

Степень совершенства цикла определена при температуре испарения хладагона  $T_{ii} = 288\text{K}$ . Следует отметить, что температура испарения хладагона в практическом используемом интервале ее значений несущественно влияет на степень совершенства цикла.

Анализ табличных значений позволяет заключить, что степень совершенства цикла в реальных условиях работы ТН при коэффициенте преобразования от 2,5 до 6 изменяется от 0,46 до 0,6. В связи с этим целесообразно принимать при предварительных расчетах степень совершенства реального цикла ТН равной 0,53.

В общем случае коэффициент преобразования ТН зависит не только от температур конденсации и испарения хладагона, но и от его теплофизических свойств и энергоэффективности работы компрессора [2, 11].

В работе [2] сделана попытка представить коэффициент преобразования как функцию безразмерного параметра, зависящего от теплофизических параметров хладагона и разности термодинамических температур конденсации и испарения хладагона.

При заданном рабочем веществе (хладогене) ТН коэффициент преобразования может быть представлен однозначной функцией разности температур конденсации и испарения. Требуемые температуры конденсации и испарения должны быть рассчитаны с учетом температур источников теплоты низкого и высокого потенциала, что позволяет по найденным температурам конденсации и испарения определить коэффициент преобразования ТН. Нельзя задаваться коэффициентом преобразования, не связывая его значение с температурами источников теплоты низкого и высокого потенциала. В случае заранее принятого коэффициента преобразования необходимо найти достигаемую при этом температуру ИТВП и оценить, достаточна ли эта температура для теплоснабжения заданных тепловых потребителей.

Коэффициент преобразования ТН при использовании хладагонов R12 и R22 может быть рассчитан по формуле, полученной при разности температур конденсации и испарения хладагона в интервале от 20 до 70°C [12]:

$$\mu = 240 (\delta t_{\text{тн}})^{-1,1}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент преобразования;

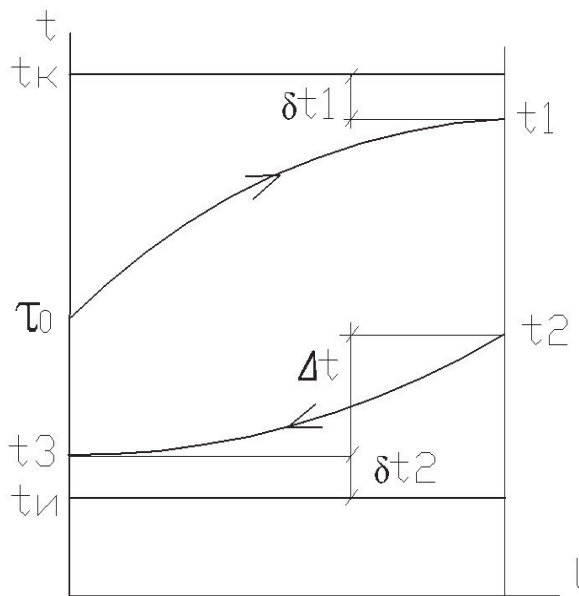
$\delta t_{\text{тн}}$  – разность температур конденсации и испарения хладагона в ТН, °C.

При этом температура конденсации находится в пределах от 30 до 80°C.

Для расчета температур конденсации и испарения следует воспользоваться графиками изменения температур в конденсаторе и испарителе (рис.1). Изменение температур в конденсаторе представлено в верхней части рисунка, а в испарителе – в нижней его части.

Температурные напоры  $\delta t_1$  и  $\delta t_2$ , а также изменение температуры  $\Delta t$  в испарителе принимают в пределах от 3 до 10°C в зависимости от вида теплоносителей (для воды – меньшие значения, а для воздуха – большие).

Согласно рис. 1, находят температуры конденсации и испарения:



*Рисунок 1. Графики изменения температур в конденсаторе и испарителе:*

*t – температура; l – длина конденсатора (испарителя);  $t_k$  – температура конденсации хладагента;  $t_0$  и  $t_1$  – температуры ИТВП на входе и выходе конденсатора;  $\delta t_1$  – наименьший температурный напор в конденсаторе;  $t_2$  и  $t_3$  – температуры ИТНП на входе и выходе испарителя;  $\Delta t$  – изменение температуры ИТНП в испарителе;  $\delta t_2$  – наименьший температурный напор в испарителе;  $t_u$  – температура испарения хладагента*

$$t_k = t_1 + \delta t_1; \quad (2)$$

$$t_u = t_2 - \delta t_2 - \Delta t. \quad (3)$$

С учетом вышеизложенных положений, была разработана методика расчета и анализа энергоэффективности ТНУ в системах теплоснабжения.

Предлагаемая методика включает следующие этапы:

- выбор источников теплоты низкого и высокого потенциала;
- определение температур принятых источников теплоты и требуемых температур конденсации и испарения рабочего вещества (хладагента) ТН;
- расчет коэффициента преобразования ТН с учетом температурных условий его работы;
- определение показателей энергоэффективности производства, передачи и трансформации электрической энергии;
- расчет экономии топлива при использовании ТНУ в системе теплоснабжения.

Для эффективной работы ТНУ необходимо наличие приемлемого для обеспечения энергосбереже-

ния ИТНП, которым могут служить грунт, подземные и поверхностные воды, водопроводная вода, солнечная энергия и атмосферный воздух.

Характеристика и общие требования, предъявляемые к ИТНП, приведены в [11]. При его выборе особое значение имеют доступность, величина температурного потенциала, возможность эффективного его использования независимо от времени суток и сезона, условия теплообмена при отводе теплоты от ИТНП, большая объемная теплоемкость и др.

Температуру ИТНП определяют исходя из климатологических и других данных, полученных для окружающей среды в регионе применения ТНУ в системе теплоснабжения.

В качестве ИТВП обычно используют нагретый воздух или горячую воду. В первом случае речь идет о применении ТНУ в системах вентиляции и воздушного отопления, а во втором – в системах водяного отопления и горячего водоснабжения. При использовании воздуха как теплоносителя в системе воздушного отопления оказывается возможным снизить температуру его нагрева и требуемую температуру конденсации хладагента, что позволяет обеспечить повышение коэффициента преобразования и энергоэффективности работы ТНУ.

Характерной температурой ИТВП является температура теплоносителя (воды или воздуха) на выходе конденсатора ТНУ, значение которой должно соответствовать температурному режиму работы теплового потребителя и может быть задано в исходных данных или найдено при тепловом расчете ТНУ.

После определения температур источников теплоты находят температуры конденсации и испарения по формулам (2) и (3), а затем коэффициент преобразования по уравнению (1).

Энергоэффективность применения ТНУ в системах теплоснабжения обычно сравнивается с применением котельных установок (водонагревателей).

Суммарный годовой расход теплоты тепловыми потребителями рассчитывают согласно нормативным документам, в частности, для систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения зданий – по СНБ 4.02.01 и СНиП 2.04.07.

Энергоэффективность применения ТНУ в системах теплоснабжения определяется относительным снижением расхода топлива за счет использования теплоты ИТНП:

$$\Delta B = (1 - k_r) \times 100\%, \quad (4)$$

где  $k_r$  – коэффициент расхода топлива как отношение расхода топлива на ТЭС при производстве электрической энергии, потребляемой ТНУ, к расходу топлива котельными установками (водонагревателями) при традиционном теплоснабжении.

Коэффициент расхода топлива находят в зависимости от показателей эффективности производства, транспортирования и использования электрической и тепловой энергии.

Экономия топлива достигается при  $k_r < 1$ .

Ожидаемое годовое снижение расходов топлива зависит от теплопроизводительности ТНУ, продолжительности работы ТНУ в течение года и показателей эффективности производства и использования тепловой и электрической энергии.

В качестве примера использования предложенной методики был выполнен расчет и анализ энергоэффективности использования ТНУ в системе горячего водоснабжения взамен газового водонагревателя, а также совместно с ним при двухступенчатой схеме нагрева воды.

Первой ступенью является ТНУ, а второй – газовый водонагреватель (Н) (рис. 2). Холодная вода (В) из водопровода с температурой  $\tau_0$  поступает в конденсатор (К) ТНУ, где нагревается до температуры  $t_1$ , после чего направляется при недостаточном нагреве в газовый водонагреватель Н, в котором нагревается до заданной температуры  $\tau_1$ . Горячая вода (ГВ) поступает к потребителям.

Теплота ИТНП, поступающего при температуре  $t_2$ , используется в испарителе (И) для испарения хладона, а затем в конденсаторе для нагрева воды. Охлаждение ИТНП в испарителе происходит до температуры  $t_3$ .

На принципиальной схеме показаны также компрессор (КМ) и терморегулирующий вентиль (ТРВ).

При принятых условиях применения ТНУ коэффициент расхода топлива

$$k_r = k_{r,1} \frac{t_1 - \tau_0}{\tau_1 - \tau_0} + \frac{\tau_1 - t_1}{\tau_1 - \tau_0}, \quad (5)$$

где  $k_{r,1}$  – коэффициент расхода топлива, характеризующий непосредственно работу ТНУ:

$$k_{r,1} = \eta_r / (\eta_e \eta_{эм} \mu), \quad (6)$$

где  $\eta_r$  – КПД источника теплоснабжения (водонагревателя);  $\eta_e$  – КПД ТЭС;  $\eta_{эс}$  – коэффициент потерь электрической энергии при передаче и трансформации.

В качестве ИТНП использована грунтовая вода температурой  $t_2 = 10^\circ\text{C}$ , а в качестве ИТВП – водопроводная вода, нагреваемая в общем случае в конденсаторе и газовом водонагревателе до температуры  $\tau_1 = 55^\circ\text{C}$ .

Для выполнения расчетов были приняты значения:

- наименьших температурных напоров:  $\delta t_1 = 3^\circ\text{C}$  и  $\delta t_2 = 4^\circ\text{C}$ ;
- изменения температуры грунтовых вод в испарителе  $\Delta t = 3^\circ\text{C}$ ;
- температуры холодной воды  $\tau_0 = 5^\circ\text{C}$ ;
- КПД газового водонагревателя  $\eta_r = 0,85$ ;

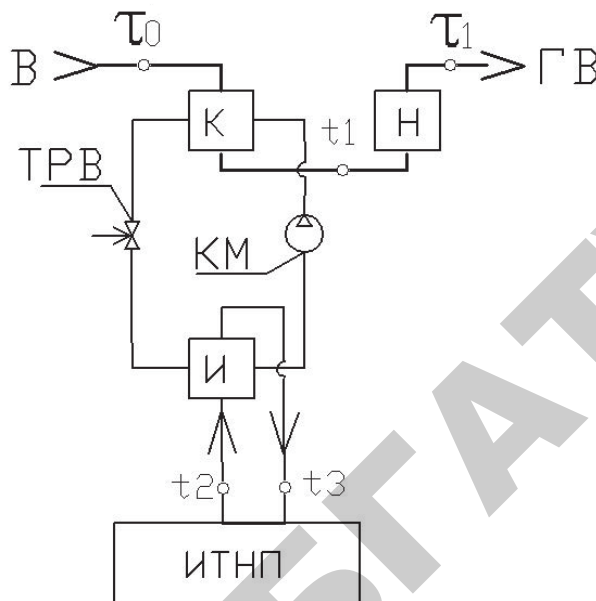


Рисунок 2. Принципиальная схема использования ТНУ в системе горячего водоснабжения

– коэффициент потерь электрической энергии  $\eta_{эс} = 0,92$ .

Температура испарения была определена по формуле (3):

$$t_{и} = 10 - 4 - 3 = 3^\circ\text{C}.$$

Расчет эффективности применения ТНУ был выполнен для двух значений КПД ТЭС, характеризующих производство электроэнергии:

- при традиционном способе работы ТЭС  $\eta_e = 0,38$ ;
- при использовании на ТЭС парогазовых установок  $\eta_e = 0,51$ .

Результаты расчетов в зависимости от температуры горячей воды  $t_1$  на выходе ТНУ приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчет энергоэффективности использования ТНУ

Параметр, единица величины	Источник, номер формулы	Вариант					
		1	2	3	4	5	6
$t_{и}, \text{C}$	(3)	3	3	3	3	3	3
$t_1, \text{C}$	Принято	20	30	35	40	45	55
$t_k, \text{C}$	(2)	23	33	38	43	48	58
$\mu$	(1)	8,9	5,7	4,8	4,15	3,64	2,92
$\eta_e = 0,38$							
$k_{r,1}$	(6)	0,27	0,43	0,51	0,59	0,67	0,832
$k_r$	(5)	0,78	0,715	0,704	0,71	0,734	0,832
$\Delta B, \%$	(4)	22,0	28,5	29,6	29,0	26,6	16,8
$\eta_e = 0,51$							
$k_{r,1}$	(6)	0,2	0,32	0,38	0,44	0,5	0,62
$k_r$	(5)	0,76	0,66	0,626	0,606	0,598	0,62
$\Delta B, \%$	(4)	24,0	34,0	37,4	39,4	40,2	38

Вариант 6 соответствует применению ТНУ в системе горячего водоснабжения без использования газового водонагревателя, т.е. по одноступенчатой схеме нагрева воды.

Результаты расчета показывают, что существует однозначная зависимость снижения расхода топлива от температуры воды на выходе ТНУ. Эта функциональная зависимость имеет четко выраженный максимум экономии топлива при вполне определенной температуре  $t_1$ . Характер зависимости определяется тем, что с увеличением температуры воды на выходе ТНУ увеличивается тепловая нагрузка ТНУ, но в связи с ростом требуемой температуры конденсации уменьшаются коэффициент преобразования и энергоэффективность работы ТНУ.

При значении  $\eta_c = 0,38$  наибольшая экономия топлива достигается в условиях двухступенчатого нагрева воды при температуре  $t_1 = 35^\circ\text{C}$ . При этом на долю ТНУ приходится 60% тепловой нагрузки системы горячего водоснабжения, а на долю газового водонагревателя – 40%. В этих условиях достигается экономия топлива в 1,8 раза большая по сравнению с использованием ТНУ по одноступенчатой схеме без использования газового водонагревателя.

При значении  $\eta_c = 0,51$  наибольшее энергосбережение в размере 40,2% обеспечивается при работе по двухступенчатой схеме нагрева при температуре воды на выходе конденсатора  $t_1 = 45^\circ\text{C}$ . В этом варианте на долю ТНУ приходится 80% тепловой нагрузки системы горячего водоснабжения, а на долю газового водонагревателя – 20%. Однако снижение расхода топлива незначительно отличается от достигаемого значения при одноступенчатой схеме включения ТНУ. В связи с этим следует рекомендовать к применению одноступенчатую схему использования ТНУ в системе горячего водоснабжения.

### Заключение

Энергоэффективность ТНУ в системах теплоснабжения определяется температурным режимом их работы.

Расчет и анализ энергоэффективности ТНУ следует производить во взаимосвязи с температурами источников теплоты низкого и высокого потенциала.

При высокой эффективности производства электрической энергии на ТЭС ( $\eta_c = 0,51$ ) снижение расходов топлива за счет использования ТНУ взамен газового водонагревателя в системе горячего водоснабжения составляет 38%.

При низкой эффективности работы ТЭС ( $\eta_c = 0,38$ ) увеличение экономии топлива может быть достигнуто при переходе к двухступенчатой схеме нагрева воды: вначале в ТНУ, а затем в газовом водона-

гревателе. Наибольшая экономия топлива в размере 29,6% достигается при оптимальной температуре нагреваемой воды на выходе ТНУ, равной  $35^\circ\text{C}$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Экономия и бережливость – важнейшие требования для поддержания национальной безопасности страны // Энергоэффективность, №8, 2010. – С. 5-10.
2. Везиришвили, О.Ш. Энергосберегающие теплонасосные системы тепло- и хладоснабжения / О.Ш. Везиришвили, Н.В. Меладзе. – М.: Изд-во МЭИ, 1994. – 160 с.
3. Жидович, И.С. Тепловые насосы: системный подход к оценке эффективности тепловых насосов/ И.С. Жидович, В.И. Трутаев // Энергоэффективность, №3, 2001. – С.44-49.
4. Янговский, Е.И. Промышленные тепловые насосы/ Е.И. Янговский, Л.А. Левин. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.
5. Богданович, М. Сравнительная оценка экономической эффективности теплонасосных станций с различным типом привода теплонасосной установки/ М. Богданович, А. Петриченко// Энергетика и ТЭК, №1, 2010. – С.16-18.
6. Богданович, М. Утилизация теплоты пара концевых уплотнений турбин с противодавлением малой мощности/ М. Богданович// Энергетика и ТЭК, №7/8, 2009. – С.24-27.
7. Жидович, И.С. Тепловые насосы для теплоснабжения. Основные положения / И.С.Жидович // Энергоэффективность, №8, 1998. – С. 14-16.
8. Мацко, И.И. Эффективность теплонасосных установок на электродогревательных / И.И.Мацко // Энергоэффективность, №8, 2009. – С.13-15.
9. Овсянник, А.В. О целесообразности использования теплонасосных установок в технологическом цикле ТЭЦ на примере Гомельской ТЭЦ-2/ А.В. Овсянник, И.И. Мацко, С.О. Бобович// Энергия и Менеджмент, №3, 2009. – С. 16-18.
10. Овсянник, А.В. Перспективы применения теплонасосных технологий в теплофикационном комплексе /А.В.Овсянник, О.Л.Рихтер, И.И.Мацко, С.О.Бобович//Энергетика, №2, 2008. – С.47-58.
11. Холодильные машины: справочник/ А.И. Азаров [и др.]; под ред. А.В. Быкова. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 224с.
12. Цубанов, А.Г. Тепловые насосы – утилизаторы теплоты отработавшего сушильного агента/ А.Г. Цубанов, А.Л. Синяков, И.А.Цубанов // Агропанорама, №2, 2010. – С.27-31.