УДК 621

Термодинамический анализ работы идеального теплового насоса

Д-р техн. наук **Б. А. ИВАНОВ**
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5

Thermodynamic analysis of work of ideal heat pump which processes are described by Carno cycle is carried out. The dependences of heat transfer coefficients, specific costs and use factor of low potential heat from the temperature of the source and the consumer of heat under any combination in the absolutely temperature field are investigated. Boundary conditions of efficiency of the ideal heat pumps are introduced. Four fields of combinations of source temperatures and consumer of heat in the temperature interval of 260–380 K being of interest for solving practical problems are suggested.

Key words: heat pump, thermodynamic analysis, efficiency.

Ключевые слова: тепловой насос, термодинамический анализ, эффективность работы.

Непрерывные процессы взаимного преобразования тепла и работы в идеальном случае могут быть описаны циклом Карно (рис. 1). В таком идеальном цикле его параметры не зависят от свойств рабочего тела и определяются только температурами T_1 («высокая» температура) и T_2 («низкая» температура), причем во всех процессах $T_1 > T_2$. В общем случае T_1 и T_2 являются независимыми переменными, поэтому параметры процессов, описываемых циклом Карно, представляют собой сложные поверхности. Это, в свою очередь, существенно затрудняет анализ зависимостей параметров процессов от температуры.

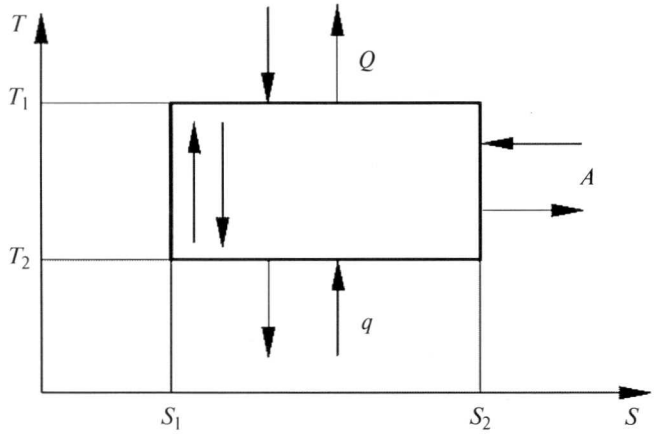

Рис. 1. Цикл Карно в координатах температура–энтропия

Цикл Карно принципиально описывает три важнейших технических процесса взаимного преобразования тепла и работы.

1. Прямой цикл Карно (цикл тепловой машины). Цикл описывает преобразование тепла в работу. Основным показателем этого процесса является термодинамический КПД идеального цикла, иногда называемый коэффициентом Карно, который определяется как

$$E_{\text{к}} = \frac{A}{Q} = \frac{Q-q}{Q} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \qquad (1)$$

где A — полученная (отведенная) в цикле работа;

Q — подведенное на температурном уровне T_1 тепло;

q — отведенное на температурном уровне T_2 тепло.

Коэффициент Карно при любых сочетаниях T_1 и T_2 остается положительной величиной и меняется в пределах от 0 ($T_1 = T_2$) до 1,0 ($T_1 = \infty$ или $T_2 = 0$). Из формулы (1) следует, что для получения работы, во-первых, необходимо иметь разность температур, а во-вторых, чтобы процесс был эффективным, необходимо либо увеличивать T_1, либо снижать T_2, либо делать это одновременно.

Анализ зависимости $E_{\text{к}}$ от T_1 и T_2, а также при одновременном изменении этих величин приведен в работах [1, 2].

2. Обратный цикл Карно (холодильный цикл). Данный цикл описывает процесс отвода тепла с низкого температурного уровня T_2 на высокий T_1. Основным показателем этого цикла принят холодильный коэффициент $E_{\text{х}}$, определяемый как

$$E_{\text{х}} = \frac{q}{A} = \frac{q}{Q-q} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}. \qquad (2)$$

Данный коэффициент показывает, сколько единиц тепла можно отвести с температурного уровня T_2 на температурный уровень T_1 при затрате единицы работы. Холодильный коэффициент является положительной величиной при любых сочетаниях T_1 и T_2 и меняется в пределах от 0 ($T_2 = 0$ или $T_1 = \infty$) до ∞ ($T_1 = T_2$).

На практике часто используют величину, обратную $E_{\text{х}}$

$$E_A = \frac{1}{E_{\text{х}}} = \frac{A}{q} = \frac{Q-q}{q} = \frac{T_1 - T_2}{T_2}. \qquad (3)$$

Эта величина показывает, сколько работы необходимо затратить для перенесения единицы тепла с температурного уровня T_2 на температурный уровень T_1.

Из формулы (3) видно, что необходимая для переноса тепла работа увеличивается при увеличении разницы температур, а также при снижении температуры T_2. Иными словами, затраты получения «холода» резко увеличиваются при снижении температуры.

Зависимости $E_{\text{х}}$ и E_A от T_1 и T_2, а также при одновременном изменении T_1 и T_2 в литературе описаны недостаточно (обычно ограничены условием $T_2 = \text{const} =$

$= 300$ K), однако их анализ можно провести по аналогии с [1, 2].

3. Цикл теплового насоса. По-существу, цикл теплового насоса (ТН) и холодильный цикл идентичны. Остаются различными решаемые задачи: в холодильном цикле — эффективный отвод тепла и понижение температуры среды, в цикле теплового насоса — эффективное получение тепла на высоком температурном уровне за счет перенесения его с низкого температурного уровня. В обоих случаях необходимо затратить работу A.

В связи с широким применением ТН, особенно за рубежом, в литературе имеется много публикаций по расчетным и эксплуатационным характеристикам ТН. Однако в теоретическом плане ряд вопросов требуют дополнения.

Рассмотрим более подробно параметры идеального теплового насоса. Принципиальная схема ТН показана на рис. 2.

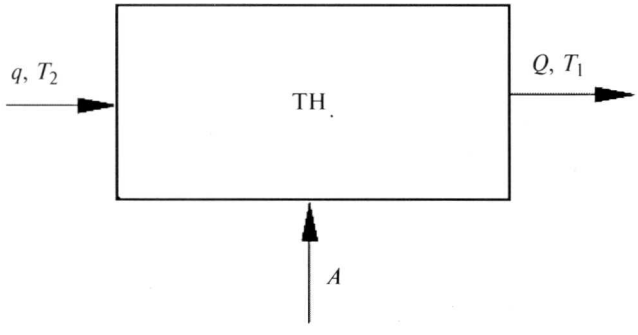

Рис. 2. Принципиальная схема работы теплового насоса

Основные соотношения параметров ТН (Q, A, q) могут характеризоваться следующими коэффициентами.

Тепловой коэффициент — коэффициент преобразования тепла

$$\varphi = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{Q-q} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}. \qquad (4)$$

Коэффициент ϕ показывает, сколько единиц тепла можно получить в тепловом насосе на единицу затраченной работы. Этот коэффициент может меняться в пределах от 1,0 ($T_2 = 0$ или $T_1 = \infty$) до ∞ ($T_1 = T_2$). При любых сочетаниях T_1 и T_2 величина φ остается положительной. Ясно, что данный коэффициент должен быть, по возможности, большим. Как видно из формулы (4), этого можно достичь: путем снижения разницы температур ($T_1 - T_2$); за счет снижения T_1 при постоянном T_2; за счет увеличения T_2 при постоянном T_1.

Коэффициент использования низкопотенциального тепла

$$\eta = \frac{q}{Q} = \frac{q}{A+q} = \frac{T_2}{T_1}. \qquad (5)$$

Этот коэффициент показывает долю внесенного извне (низкопотенциального) тепла к общему произведенному (высокопотенциальному) в ТН теплу. Он также всегда положителен, меняется в пределах от 0 до 1,0.

Значение $\eta = 0$ получается при $T_2 = 0$ или $T_1 = \infty$. Это означает, что при $q \to 0$ или $Q \to \infty$ практически все тепло Q получается за счет подводимой работы A ($q \ll A$). Таким образом, очень малые значения η определяют значительную долю работы в полученном тепле. Применение ТН становится нецелесообразным, поскольку появляется возможность непосредственного преобразования A в Q, как это делается, например, в электронагревательных устройствах, где можно получать любые Q при любых необходимых T_1.

Значение $\eta = 1{,}0$ получается при $T_1 = T_2$, это означает $q = Q$ и $q \gg A$, т. е. все продукционное тепло Q получается за счет внесенного тепла q, что, конечно, очень привлекательно ($A = 0$). Однако при $\eta = 1{,}0$ должно выполняться условие $T_1 = T_2$, что также делает нерациональным применение ТН, поскольку при $\Delta T = 0$ возможен прямой теплообмен, когда температура холодного источника T_2 соответствует требуемой высокой температуре T_1.

Таким образом, значение η должно быть достаточно большим и выбираться из возможных соотношений T_1 и T_2.

Коэффициент удельных затрат на получение высокопотенциального тепла

$$Z = \frac{A}{Q} = \frac{Q-q}{Q} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \qquad (6)$$

Данный коэффициент показывает, сколько единиц работы необходимо использовать на получение единицы полезного высокопотенциального тепла. Коэффициент Z всегда положительный и меняется в пределах от 0 ($T_1 = T_2$) до 1 ($T_2 = 0$ или $T_1 = \infty$).

При $Z = 1$ $Q = A$, т. е. все тепло получается за счет подведенной работы. При $Z = 0$ $A = 0$, $Q = q$, но $\Delta T = 0$. Таким образом, крайние значения Z также являются неприемлемыми. Поэтому значение Z должно быть достаточно малым, но его величина так же, как и величина η, должна выбираться или получаться из возможных либо требуемых соотношений T_1 и T_2 и $\Delta T = T_1 - T_2$.

Прежде чем перейти к анализу зависимости параметров цикла ТН от температур T_1 и T_2, отметим, что все рассмотренные выше коэффициенты формально могут быть выражены друг через друга, поскольку каждый из них является функцией T_1 и T_2:

$$\left.\begin{array}{l} \varphi = 1/E_{\text{к}}; \\ \varphi = 1 + E_x; \\ \varphi = 1/(1-\eta); \\ \varphi = 1/Z; \\ \eta + Z = 1; E_{\text{к}} = 1/(1+E_x). \end{array}\right\} \qquad (7)$$

Как уже упоминалось ранее, анализ зависимости указанных коэффициентов от температур T_1 и T_2 затруднен, поскольку их возможные значения находятся на плоскости в трехмерном пространстве K–T_1–T_2. Поэтому, как и в работе [1], можно воспользоваться сечениями этой плоскости, которые представляют наглядные кривые в координатах $K = f(T_1)$ при $T_2 = \text{const}$ и $K = f(T_2)$ при $T_1 = \text{const}$.

Однако даже при таких упрощениях область возможных сочетаний температур T_1 и T_2 бесконечно велика, поскольку переменные и постоянные значения температур могут принимать любые значения, ограниченные только условием $T_1 > T_2$. Поэтому в общем случае будем представлять зависимости $K = f(T_1, T_2)$ в «условно безразмерном виде», другими словами, значение переменной величины в абсолютном поле температур будем задавать в долях или частях другой величины, принятой в качестве постоянной.

При таком подходе появляется, кроме нуля температуры, еще одна универсальная реперная точка, соответствующая условию $T_1 = T_2$, и все зависимости, поскольку всегда $T_1 > T_2$, находятся слева или справа от этой точки. Если задавать постоянной T_1, то слева $T_2 = \text{var}$, $T_2 < T_1$; если задавать постоянной T_2, то справа $T_1 = \text{var}$, $T_1 > T_2$.

Точка $T_1 = T_2$ может быть размещена в любом месте абсолютной температурной шкалы, а все зависимости $K = f(T_1, T_2)$ должны удовлетворять условиям: $T_1 > 0$, $T_2 > 0$, $T_1 > T_2$. Масштабом является расстояние от нуля температуры до $T_1 = T_2$, которое равняется значению $T_2 = \text{const}$ при $T_1 = \text{var}$ и $T_1 = \text{const}$ при $T_2 = \text{var}$.

Построенные таким образом универсальные зависимости (они справедливы в любом месте температурной шкалы) коэффициентов φ, η, и Z показаны на рис. 3 и 4.

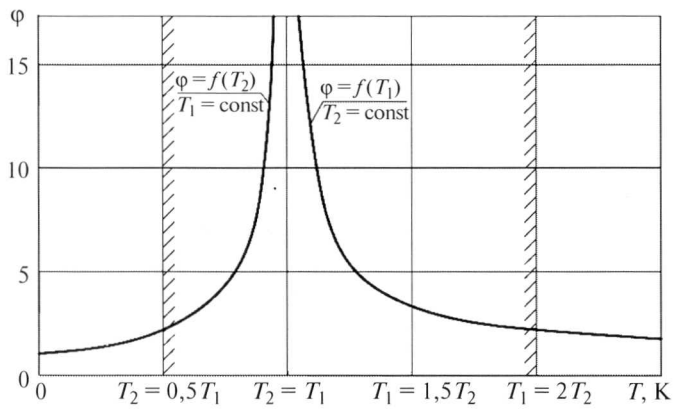

Рис. 3. Значения коэффициента преобразования тепла φ при различных сочетаниях T_1 и T_2 в абсолютном поле температур

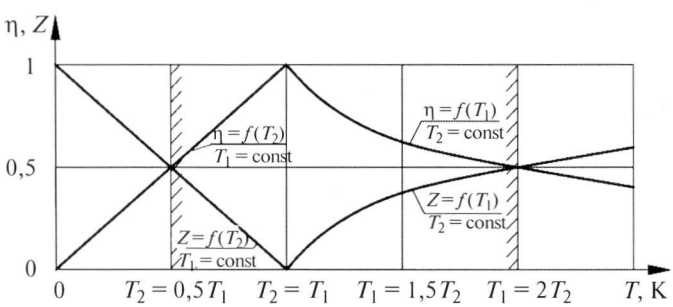

Рис. 4. Значения коэффициентов η и Z при различных сочетаниях T_1 и T_2 в абсолютном поле температур

Предлагаемый метод расчета существенно упрощает анализ зависимости параметров ТН от температур T_1 и T_2 в любом диапазоне их изменения на абсолютной температурной шкале. Для получения количественных данных достаточно задать значение одного известного (или принимаемого) параметра T_1 или T_2 и использовать приведенные универсальные безразмерные зависимости. Что показывает их анализ?

Во-первых, с уменьшением разницы между T_1 и T_2, независимо от того, происходит увеличение T_2 при $T_1 = \text{const}$ или уменьшение T_1 при $T_2 = \text{const}$, все три коэффициента изменяются в положительную сторону: увеличивается удельное тепло $Q(\varphi)$, уменьшается удельная работа Z, увеличивается доля внесенного тепла η. Однако ΔT нельзя уменьшать до бесконечности, так как при $\Delta T \to 0$ теряется основное назначение теплового насоса — трансформация «низкопотенциального» тепла в «высокопотенциальное» (отметим, что эти понятия относительные). Поэтому снижение ΔT будет ограничиваться практическими или экономическими соображениями, т. е. реальными температурами низкопотенциального источника тепла или необходимой температурой высокопотенциального тепла.

Во-вторых, как видно из графиков, эффективность ТН при увеличении $\Delta\ T$ резко снижается. При значениях $T_2 = 0{,}5T_1$ и $T_1 = 2T_2$ коэффициенты η и Z равны 0,5, а $\varphi = 2$, т. е. доля внесенного тепла q становится равной произведенной работе A и равняется половине от всего продукционного тепла Q.

При больших значениях ΔT ($T_1 > 2T_2$ или $T_2 < 0{,}5T_1$) параметр φ меняется очень слабо, а общее количество тепла получается главным образом за счет работы теплового насоса.

Например, 80 % тепла получают за счет работы ТН при $\eta = 0{,}2 = q/Q = q/(q + A)$, $A = 4q$, $\varphi = 1{,}25$. Таким образом, температурная зона эффективной работы идеальных тепловых насосов при $\varphi \geqslant 2$:

$$T_1 < 2T_2 \quad \text{или} \quad T_2 > 0{,}5T_1. \tag{8}$$

В литературе по ТН отмечается, что φ практически является только функцией ΔT и ее величину можно принять не зависящей от T_1 или T_2. На рис. 5 показаны зависимости φ от T_1 при различных значениях $\Delta\ T$ (зависимости от T_2 будут иметь тот же характер).

Из графика следует, что зависимость φ от температуры T_1 (или T_2) существует и она при небольших ΔT достаточно сильная. Однако также видно, что с переходом в область больших ΔT зависимость практически прекращается. Рассмотрим зависимость φ от T_1 и T_2 в интервале температур, представляющих в настоящее время наибольший практический интерес ($260 < T < 380$ K).

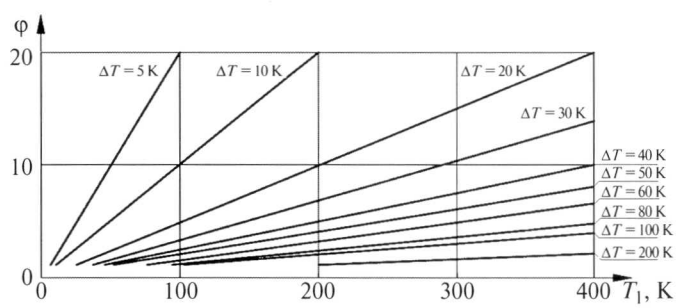

Рис. 5. Значения коэффициента преобразования тепла φ при различных сочетаниях T_1 и T_2

Значения φ при различных сочетаниях T_1 и T_2 приведены в таблице и показаны на рис. 6 и 7.

Применительно к рассматриваемому диапазону температур эти данные позволяют сделать следующие выводы:

1. Эффективность ТН возрастает при уменьшении ΔT и увеличении T_1 (при $\Delta T = \text{const}$); однако влияние ΔT значительно более сильное, чем T_1. В диапазоне температур 270–380 K и при $\Delta T < 40$ K для оценочных расчетов можно принимать параметр φ, не зависящий от температуры, как функцию ΔT (ошибка не более 10–15 %).

Значения φ при различных сочетаниях T_1 и T_2 и области применения тепловых насосов

T_2 \ T_1	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	
260	27	14	9,66	7,5	6,2	5,33	4,7	4,25	3,9	3,6	3,36	3,16	
270	*	28	14,5	10	7,8	6,4	5,5	4,86	4,4	4,0	3,7	3,45	**I**
280		*	29	15	10,33	8	6,6	5,66	5,3	4,75	4,1	3,8	
290			*	30	15,5	10,66	8,25	6,8	5,8	5,15	4,6	4,2	
300				*	31	16	11	8,5	7,0	6,0	5,3	4,8	
310					*	32	16,5	10,1	8,75	7,2	6,2	5,4	
320						*	33	17	11,66	9,0	7,4	6,33	**II**
330							*	34	17,5	12	9,25	7,6	
340								*	35	18	12,33	9,5	
350									*	36	18,5	12,66	
360										*	37	19	**III**
370											*	38	**IV**

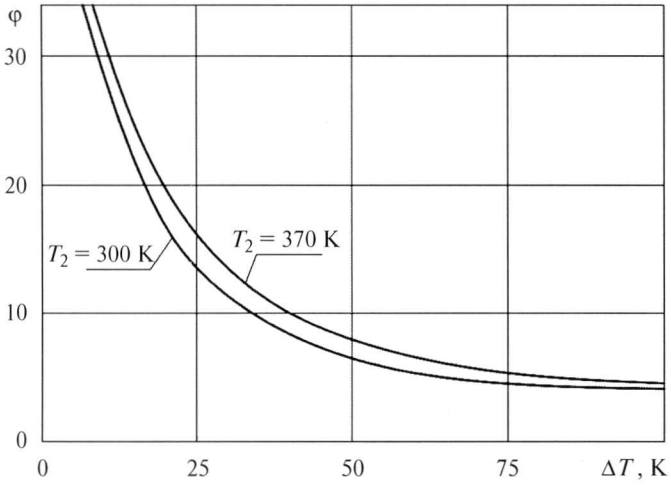

Рис. 6. Зависимость коэффициента преобразования тепла φ от ΔT при постоянных значениях T_2

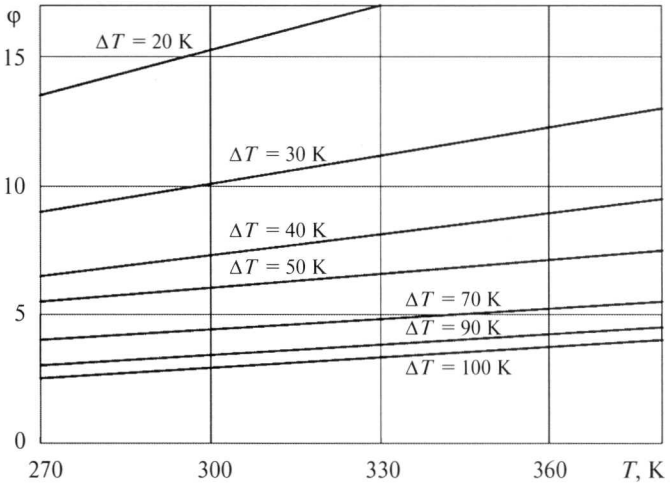

Рис. 7. Значения коэффициента преобразования тепла φ при различных сочетаниях T_1 и ΔT в диапазоне температур 270–380 K

2. При отоплении помещений с помощью ТН, когда имеется возможность выбора температуры радиатора (T_1), следует снижать T_1 до экономически оправданного значения — сопоставления стоимости увеличения поверхности радиаторов и снижения их температуры. Например, при использовании ТН для режима $T_2 = 0\,°\mathrm{C}$ (273 K) = const, T_1 = var, температуры в помещении $T_п = 20\,°\mathrm{C}$ (293 K) можно использовать радиаторы с температурой $T_1 = 50\,°\mathrm{C}$ (323 K) или 25 °C (298 K).

В первом случае ($T_1 - T_п = 30\,°\mathrm{C}$)

$$\varphi_1 = \frac{323}{323 - 273} = 6{,}46.$$

Во втором случае ($T_1 - T_п = 5\,°\mathrm{C}$)

$$\varphi_2 = \frac{298}{298 - 273} = 11{,}92.$$

В обоих случаях применение ТН крайне выгодно — снижение в 6,5 и 12 раз потребления электроэнергии по сравнению с прямым электрическим обогревом.

Из условия пригодности отопления в обоих случаях имеем

$$Q_1 = Q_2 = C(T_1 - T_п)S_1 = C(T_{12} - T_п)S_2,$$

где $S_2 = 6S_1$, т. е. для реализации φ_2 необходимо увеличить площадь радиатора в шесть раз, что, естественно, увеличит капитальные затраты К;

C — коэффициент теплоотдачи.

Сравнивая величину капитальных затрат ΔК и стоимость экономии электроэнергии ΔЭ за время t, можно оценить срок окупаемости как в первом и во втором рассматриваемых случаях применения ТН, так и при модернизации — переходе от первого ко второму случаю:

$$t = \frac{\Delta К}{\Delta Э}.$$

В качестве ближайшей перспективы следует рассматривать условия широкого применения ТН для отопления, когда вместо радиаторов используются «теплые» полы или стены либо то и другое вместе. При этом технически просто решается вопрос об изменении величины теплой поверхности, а ΔT может быть минимальным.

Таким образом, применение для обогрева помещений теплового насоса теоретически в 12–13 раз более экономично по сравнению с прямым электрическим обогревом с помощью калориферов, тепловых пушек, электрокаминов и т. д.

Получить реальный φ с таким показателем невозможно, но из практики известно, что современные ТН имеют $\varphi_{реал} \approx 0{,}5\varphi_{теор}$, т. е. экономия электроэнергии в пять–шесть раз вполне достижима.

3. Исходя из ранее установленного условия эффективной работы ТН ($T_1 < 2T_2$ и $T_2 > 0{,}5T_1$, $\varphi \geqslant 2$) и принимая $\varphi_{реал} = 0{,}5\varphi_{теор}$, можно условно выделить четыре области применения ТН в практически важном интервале температур от 260 до 380 К (см. рис. 3, 4 и таблицу).

I. В этой области применение ТН недостаточно эффективно: $\varphi_{реал} < 2$; $Z \geqslant 0{,}5$; $\eta \leqslant 0{,}5$; $\Delta T > 80$ К.

II. В этой области ТН могут иметь широкое практическое применение.

Создавая практически важный $\Delta T = 40 \div 80$ К при высоких значениях $\varphi_{реал}$, они «закрывают» вопросы утилизации низкопотенциального тепла (земля, вода, воздух, стоки, термальные источники и др.) для нужд отопления, а также для многих других технических и технологических целей.

III. В этой области применение ТН теоретически крайне эффективно. Однако разница температур источника и потребителя тепла не очень велика $\Delta T = 20 \div 30$ К, что может в ряде случаев ограничивать широкое практическое использование ТН при указанных сочетаниях температур источника и потребителя тепла.

IV. В этой области значения $\varphi_{теор}$ исключительно высоки, но $\Delta T \leqslant 10$ К, т. е. практически очень сложно реализовать работу реального ТН при таких малых суммарных перепадах температур. Кроме того, в настоящее время нет четко сформулированных технических задач для указанных условий. Другие сочетания температур в рассмотренной области запрещены условием $T_1 > T_2$.

Список литературы

1. *Иванов Б. А.* Еще раз о коэффициенте преобразования теплоты в работу (коэффициенте Карно) // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2008. № 2.

2. *Иванов Б. А.* Эффективность теплоэнергетических машин в области низких температур // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение. Специальный выпуск». 2010.