

Кшевецкий О.С. канд. физ.-мат. наук



Кшевецкий О.С.

Черновицкий торгово-экономический институт
Киевского национального торгово-экономического университета,
Центральная площадь, 7, г. Черновцы, 58002, Украина
e-mail: kshevos@gmail.com

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧАСТНОГО СЛУЧАЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАСООБМЕНА МЕЖДУ ТЕПЛОВЫМИ НАСОСАМИ И ПОДВИЖНЫМ ВЕЩЕСТВОМ, ЧАСТЬ 1

Получены математические выражения для оценки эффективности работы частного случая способа тепломассообмена между подвижным веществом и тепловыми насосами с их теплообменными частями, при котором подвижное вещество (или, по крайней мере, часть этого подвижного вещества) приводится в тепловой контакт с теплопоглощающей и тепловыделяющей теплообменными частями, минимум двух реальных тепловых насосов. Библ. 16, Рис. 3.

Ключевые слова: тепловой насос, термоэлектрический тепловой насос, подвижное вещество, тепломассообмен, эффективность, энергоэффективность.

Введение

Известно, что значения холодильного и отопительного коэффициентов типичных тепловых насосов (ТН) (далее в тексте вместо словосочетания «тепловой насос» или вместо словосочетания «тепловые насосы» будем использовать аббревиатуру ТН) при уменьшении перепада температур между их теплопоглощающей и тепловыделяющей теплообменными частями (ТЧ) при фиксированной температуре одной из ТЧ ТН возрастают [1, 2]. В связи с этим актуальным, в частности, с точки зрения энергоэффективности, является поиск таких применений ТН, в частности, термоэлектрических ТН, при которых бы эти ТН могли работать при возможно меньших, относительно небольших перепадах температур между их теплопоглощающей и тепловыделяющей ТЧ.

Рассмотрим процессы при участии подвижного вещества (ПВ), в которых необходимо это ПВ нагревать и/или охлаждать. В таких процессах для нагревания и/или охлаждения ПВ, а также для уменьшения энергозатрат, необходимых для нагревания и/или охлаждения ПВ, можно использовать ТН [3 – 16].

Разные способы тепломассообмена между ПВ и одним или несколькими ТН с соответствующими ТЧ, которые не предусматривают то, что ПВ (или, по крайней мере, часть этого ПВ) приводят в тепловой контакт (ТК) с теплопоглощающей и тепловыделяющей ТЧ по крайней мере двух ТН, описаны, например, в [3 – 13].

В [12] ПВ приводят в ТК с двумя металлическими теплообменниками (ТЧ ТН), которые имеют ТК с четырьмя термоэлектрическими модулями. При этом имеет место ТК между термоэлектрическими модулями через их общие металлические теплообменники. Поэтому в этом случае четыре термоэлектрических модуля, имеющих только одну общую

теплопоглощающую и только одну общую тепловыделяющую ТЧ, можно функционально рассматривать как один ТН на основе четырех термоэлектрических модулей, которые параллельно соединены в тепловом отношении.

Как и в [12], в [13] также используют несколько термоэлектрических модулей. Но, в отличие от [12], в [13] каждый термоэлектрический модуль имеет свои отдельные ТЧ, теплоизолированные друг от друга. Это дает возможность говорить здесь о нескольких ТН. Но при этом разные ТЧ каждого из отдельно взятых ТН используют для теплообмена с разными ПВ.

Если же рассмотреть процессы, в которых ПВ (или, по крайней мере, часть этого ПВ) приводят в ТК с теплопоглощающей и тепловыделяющей ТЧ по крайней мере двух ТН, то в некоторых из этих процессов [14–16] возможна реализация ситуации, когда эти ТН будут работать при относительно небольших перепадах температур между их теплопоглощающей и тепловыделяющей ТЧ. В [14–15] приведены математические выражения для приближенного оценочного расчета распределения температур ПВ при использовании в этих процессах идеальных ТН, работающих по циклу Карно. В то же время хорошо известно, что эффективность работы реальных ТН может отличаться от эффективности работы ТН, работающих по циклу Карно [2].

Целью работы является создание математического метода приближенной количественной оценки эффективности (в первую очередь – энергоэффективности) частного случая способа тепломассообмена между ПВ и ТН с их ТЧ, при котором ПВ (или, по крайней мере часть этого ПВ) приводят в ТК с теплопоглощающей и тепловыделяющей ТЧ по крайней мере двух ТН [14–16]. Будем рассматривать этот частный случай (описанный в работах [14–16]) потому, что в этом случае возможна реализация ситуации, когда ТН будут работать при относительно небольших перепадах температур между их теплопоглощающей и тепловыделяющей ТЧ. Далее по тексту для того, чтобы указать на этот частный случай способа тепломассообмена между ПВ и ТН с их ТЧ будем использовать словосочетание «*исследуемый способ тепломассообмена*». То, что в исследуемом способе тепломассообмена возможна реализация ситуации, когда ТН будут работать при относительно небольших перепадах температур между их теплопоглощающей и тепловыделяющей ТЧ может создать предпосылки для возможного повышения энергоэффективности процессов тепломассообмена, которые предусматривают нагревание и охлаждение ПВ [14–16]. Поэтому задачей настоящей работы является получения математических выражений, которые можно было бы использовать для оценки эффективности исследуемого способа тепломассообмена с использованием, в частности, реальных ТН, например, термоэлектрических ТН или компрессионных ТН.

Общее описание и особенности исследуемого способа тепломассообмена

Общая схема *исследуемого способа тепломассообмена* представлена на рис. 1. ТН на схеме условно обозначены прямоугольниками. Каждый отдельно взятый ТН имеет 1-ю ТЧ и 2-ю ТЧ. Одна из этих ТЧ является теплопоглощающей, а другая – тепловыделяющей. Какая из этих ТЧ теплопоглощающая, а какая – тепловыделяющая здесь не конкретизируется. ТЧ на этой схеме и на дальнейших схемах отдельно не обозначены. ПВ, согласно схеме рис. 1, движется от входа к выходу таким образом, что поочередно имеют место ТК и соответствующие процессы теплообмена этого ПВ со всеми ТЧ всех ТН. Входным потоком ПВ на этой и дальнейших схемах будем считать поток ПВ между точками 1.0 и 1.п. А выходным

потоком ПВ на этой и дальнейших схемах будем считать поток этого ПВ между точками 2.n и 2.0.

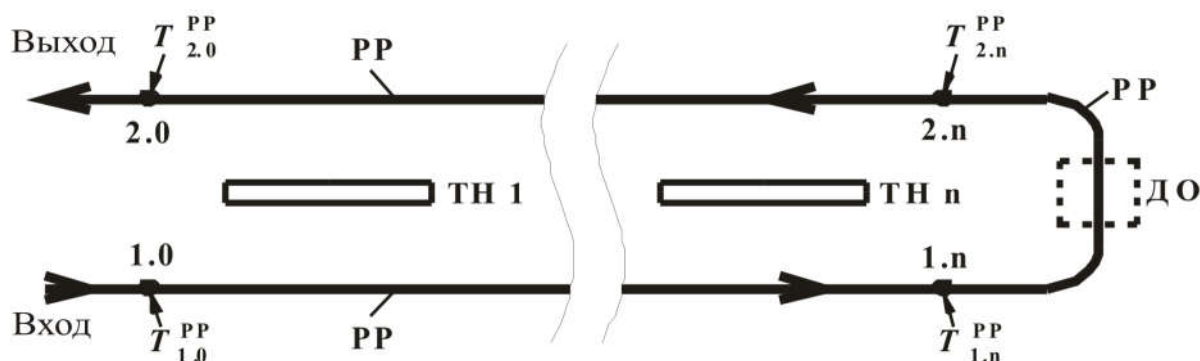


Рис. 1. Схема исследуемого способа теплообмена: направление движения ПВ указано стрелками; ТН 1, ТН n – ТН общим количеством n; К – дополнительный объем (например, сушильная камера устройства для сушки, помещение или салон транспортного средства), в котором ПВ может принимать участие в теплообменных процессах с другим веществом или с окружающей средой; 1.0, 1.n, 2.n, 2.0 – точки, которые отвечают последовательным положениям ПВ в процессе его движения (1.0 – непосредственно перед ТК ПВ с 1-й ТЧ ТН 1; 1.n – сразу же после ТК ПВ с 1-й ТЧ ТН n; 2.n – непосредственно перед ТК ПВ со 2-й ТЧ ТН, 2.0 – сразу же после ТК ПВ со 2-й ТЧ ТН 1); $T_{1.0}^{PP}$,

$T_{1.n}^{PP}$, $T_{2.n}^{PP}$, $T_{2.0}^{PP}$ – температуры ПВ в соответствующих точках.

Для дальнейших оценочных расчетов будем использовать упрощенную модель со следующими допущениями.

1. Теплообмен между ТН осуществляется только благодаря движению ПВ.
2. Теплообмен ТН и ПВ с окружающей средой отсутствует (за исключением возможного теплообмена ПВ с окружающей средой с использованием К).
3. Изменения температуры в пределах каждой отдельно взятой ТЧ ТН отсутствуют.
4. Теплообмен ПВ с ТЧ (поверхностями, радиаторами) ТН таков, что ПВ после ее ТК с определенной ТЧ соответствующего ТН приобретает температуру этой ТЧ.
5. В ТК с каждой отдельно взятой ТЧ всех ТН поочередно приводят все ПВ.
6. Для всех положений ПВ в процессе его движения справедливо соотношение:

$$\Delta T^{ПВ} = d \cdot Q^{ПВ}, \quad (1)$$

где $Q^{ПВ}$ – тепловой поток от или к ПВ на определенном участке его движения, значение которого всегда неотрицательно; $\Delta T^{ПВ}$ – перепад температур ПВ на этом участке его движения, который будем определять (здесь и аналогично далее по тексту), вычитая из большей температуры ПВ меньшую; d – коэффициент пропорциональности. Это может иметь место, если, например, теплоемкость ПВ постоянна во всем процессе теплообмена и отсутствуют процессы (например, фазовые переходы, изменения давления), сопровождающиеся выделением или поглощением тепла.

7. Количество ПВ в процессе его движения не изменяется.

8. Все ТН работают в таких условиях, когда температура теплопоглощающей ТЧ каждого отдельно взятого ТН меньше температуры тепловыделяющей ТЧ того же ТН.

Также в отдельных случаях будем использовать следующее допущение.

9. Все изменения температуры ПВ в результате его ТК с каждой отдельно взятой ТЧ ТН во входном потоке этого ПВ одинаковые.

На использование допущения 9 будем специально указывать.

С использованием соответствующих допущений (описанных выше), в частности, соотношения (1), для холодильного коэффициента ε_i и для отопительного коэффициента μ_i произвольного i -го ТН можно записать следующие соотношения:

$$\varepsilon_i = \frac{Q_{cool,i}^{TH}}{W_i^{TH}} = \frac{Q_{cool,i}^{TH}}{Q_{hot,i}^{TH} - Q_{cool,i}^{TH}} = \frac{\Delta T_{cool,i}^{ПВ}}{\Delta T_{hot,i}^{ПВ} - \Delta T_{cool,i}^{ПВ}}, \quad (2)$$

$$\mu_i = \frac{Q_{hot,i}^{TH}}{W_i^{TH}} = \frac{Q_{hot,i}^{TH}}{Q_{hot,i}^{TH} - Q_{cool,i}^{TH}} = \frac{\Delta T_{hot,i}^{ПВ}}{\Delta T_{hot,i}^{ПВ} - \Delta T_{cool,i}^{ПВ}}, \quad (3)$$

где $Q_{cool,i}^{TH}$ – тепловой поток, который i -й ТН поглощает (благодаря соответствующей своей теплопоглощающей ТЧ) от ПВ; $Q_{hot,i}^{TH}$ – тепловой поток, который i -й ТН отдает (благодаря соответствующей своей тепловыделяющей ТЧ) ПВ; W_i^{TH} – мощность, которую потребляет и, благодаря которой работает i -й ТН (например, это может быть электрическая мощность, которую i -й ТН потребляет от внешнего отдельного источника питания); $\Delta T_{cool,i}^{ПВ}$, $\Delta T_{hot,i}^{ПВ}$ – перепады температур ПВ, возникающие вследствие теплового контакта ПВ с соответственно теплопоглощающей и тепловыделяющей ТЧ i -го ТН на соответствующих участках его движения.

Холодильный и отопительный коэффициенты реальных ТН могут быть меньшими, чем соответственно холодильный и отопительный коэффициенты идеальных ТН, работающих по циклу Карно [2]. Для того, чтобы это учесть примем, что для i -го ТН его холодильный коэффициент ε_i и его отопительный коэффициент μ_i определяются из соотношений:

$$\varepsilon_i = A_i \cdot \varepsilon_{K,i} = A_i \cdot \frac{Q_{cool,i}^{TH^K}}{W_i^{TH^K}} = A_i \cdot \frac{T_{cool,i}^{TH^K}}{T_{hot,i}^{TH^K} - T_{cool,i}^{TH^K}}, \quad A_i \leq 1, \quad (4)$$

$$\mu_i = B_i \cdot \mu_{K,i} = B_i \cdot \frac{Q_{hot,i}^{TH^K}}{W_i^{TH^K}} = B_i \cdot \frac{T_{hot,i}^{TH^K}}{T_{hot,i}^{TH^K} - T_{cool,i}^{TH^K}}, \quad B_i \leq 1, \quad (5)$$

при следующих дополнительных условиях:

$$W_i^{TH^K} = W_i^{TH}, \quad (6)$$

$$T_{cool,i}^{TH^K} = T_{cool,i}^{TH}, \quad (7)$$

$$T_{hot,i}^{TH^K} = T_{hot,i}^{TH} \quad (8)$$

где A_i – безразмерный множитель, учитывающий особенности конструкции и применения i -го ТН, обуславливающие отличие холодильного коэффициента этого ТН от холодильного коэффициента идеального ТН, работающего при тех же условиях по циклу Карно; B_i – безразмерный множитель, учитывающий особенности конструкции и применения i -го ТН, обуславливающие отличие отопительного коэффициента этого ТН от отопительного коэффициента идеального ТН, работающего при тех же условиях по циклу Карно; $\varepsilon_{K,i}$ – холодильный коэффициент идеального ТН, работающего по циклу Карно в тех же условиях, что и i -й ТН; $\mu_{K,i}$ – отопительный коэффициент идеального ТН, работающего по циклу Карно в тех же условиях, что и i -й ТН; $Q_{cool,i}^{TH^K}$ – тепловой поток, поглощаемый идеальным ТН, работающим по циклу Карно (TH^K) в тех же условиях, что и i -й ТН; $Q_{hot,i}^{TH^K}$ – тепловой поток, отдаваемый идеальным ТН, работающим по циклу Карно (TH^K) в тех же условиях, что и i -й ТН; $W_i^{TH^K}$ – мощность, которую потребляет и, благодаря которой работает идеальный ТН, работающий по циклу Карно (TH^K) в тех же условиях, что и i -й ТН; $T_{cool,i}^{TH^K}$ – температура теплопоглощающей ТЧ идеального ТН, работающего по циклу Карно в тех же условиях, что и i -й ТН; $T_{cool,i}^{TH}$ – температура теплопоглощающей ТЧ i -го ТН; $T_{hot,i}^{TH^K}$ – температура тепловыделяющей ТЧ идеального ТН, работающего по циклу Карно (TH^K) в тех же условиях, что и i -й ТН; $T_{hot,i}^{TH}$ – температура тепловыделяющей ТЧ i -го ТН.

Из выражений (4)-(8) вытекают следующие соотношения:

$$\varepsilon_i = A_i \cdot \frac{T_{cool,i}^{TH}}{T_{hot,i}^{TH} - T_{cool,i}^{TH}}, \quad A_i \leq 1, \quad (9)$$

$$\mu_i = B_i \cdot \frac{T_{hot,i}^{TH}}{T_{hot,i}^{TH} - T_{cool,i}^{TH}}, \quad B_i \leq 1. \quad (10)$$

Хорошо известно, что ε_i и μ_i , а также $\varepsilon_{K,i}$ и $\mu_{K,i}$ связаны соотношениями:

$$\mu_i = \varepsilon_i + 1, \quad (11)$$

$$\mu_{K,i} = \varepsilon_{K,i} + 1. \quad (12)$$

Используя соотношения (9) - (12) можно найти соотношение между A_i и B_i :

$$A_i = (B_i - 1) \frac{T_{hot,i}^{TH}}{T_{cool,i}^{TH}} + 1, \quad (13)$$

$$B_i = (A_i - 1) \frac{T_{cool,i}^{TH}}{T_{hot,i}^{TH}} + 1. \quad (14)$$

На основе выражений (2) и (9), а также (3) и (10) можно записать следующие соотношения, определяющие температурный режим работы i -го ТН:

$$\frac{\Delta T_{cool,i}^{PB}}{\Delta T_{hot,i}^{PB} - \Delta T_{cool,i}^{PB}} = A_i \frac{T_{cool,i}^{TH}}{T_{hot,i}^{TH} - T_{cool,i}^{TH}}, \quad (15)$$

$$\frac{\Delta T_{hot,i}^{PB}}{\Delta T_{hot,i}^{PB} - \Delta T_{cool,i}^{PB}} = B_i \frac{T_{hot,i}^{TH}}{T_{hot,i}^{TH} - T_{cool,i}^{TH}}. \quad (16)$$

Далее рассмотрим два частных случая исследуемого способа теплообмена.

Случай охлаждения ПВ в его входном потоке всеми ТН

Схема случая исследуемого способа теплообмена, в котором ПВ в его входном потоке охлаждается всеми отдельно взятыми ТН, представлена на рис. 2.

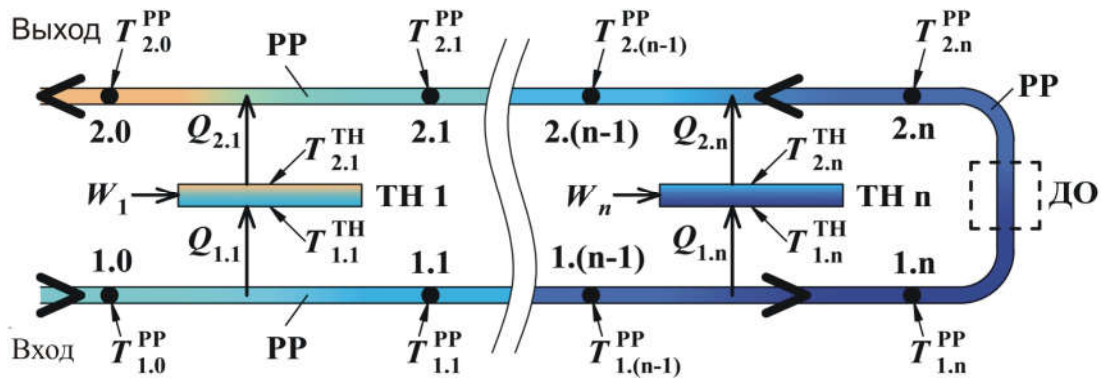


Рис. 2. Схема исследуемого способа теплообмена для случая охлаждения ПВ в его входном потоке всеми отдельно взятыми ТН: 1.0, 1.1, 2.0, 2.1 – точки, которые отвечают последовательным положениям ПВ в процессе его движения (1.0 – непосредственно перед ТК ПВ с 1-й (телопоглощающей) ТЧ ТН 1; 1.1 – сразу же после ТК ПВ с 1-й ТЧ ТН 1; 1.(n-1) – непосредственно перед ТК ПВ с 1-й (телопоглощающей) ТЧ ТН n; 1.n – сразу же после ТК ПВ с 1-й ТЧ ТН n; 2.n – непосредственно перед ТК ПВ со 2-й (теловыделяющей) ТЧ ТН n; 2.(n-1) – сразу же после ТК ПВ со 2-й ТЧ ТН n; 2.1 – непосредственно перед ТК ПВ со 2-й (теловыделяющей) ТЧ ТН 1; 2.0 – сразу же после ТК ПВ со 2-й ТЧ ТН 1); $T_{1.0}^{PB}, T_{1.n}^{PB}, T_{2.n}^{PB}, T_{2.0}^{PB}$ – температуры ПВ в соответствующих точках; W_1, \dots, W_n – мощности питания (например, электрического) соответствующих ТН; $Q_{1.1}, Q_{1.n}$ – тепловые потоки от ПВ к 1-м (телопоглощающим) ТЧ соответствующих ТН; $Q_{2.n}, Q_{2.1}$ – тепловые потоки от 2-х (теловыделяющих) ТЧ соответствующих ТН к ПВ; $T_{1.1}^{TH}, T_{1.n}^{TH}$ – температуры 1-х (телопоглощающих) ТЧ соответствующих ТН; $T_{2.1}^{TH}, T_{2.n}^{TH}$ – температуры 2-х (теловыделяющих) ТЧ соответствующих ТН; другие обозначения на этом рисунке аналогичны соответствующим обозначениям на рис. 1.

Для этого случая исследуемого способа теплообмена, учитывая то, что ПВ, согласно схеме на рис. 2 в его входном потоке охлаждается всеми отдельно взятыми ТН, а в его выходном потоке нагревается всеми отдельно взятыми ТН, запишем (с использованием обозначений на рис. 2):

$$T_{cool,i}^{TH} = T_{1,i}^{TH}, \quad i = 1 \div n, \quad (17)$$

$$T_{cool,(i-1)}^{PB} = T_{1,(i-1)}^{PB}, \quad T_{cool,i}^{PB} = T_{1,i}^{PB}, \quad i = 1 \div n, \quad (18)$$

$$T_{hot,i}^{TH} = T_{2,i}^{TH}, \quad i = 1 \div n, \quad (19)$$

$$T_{hot,(i-1)}^{PB} = T_{2,(i-1)}^{PB}, \quad T_{hot,i}^{PB} = T_{2,i}^{PB}, \quad i = 1 \div n, \quad (20)$$

$$\Delta T_{cool,i}^{PB} = T_{cool,(i-1)}^{PB} - T_{cool,i}^{PB}, \quad (21)$$

$$\Delta T_{hot,i}^{PB} = T_{hot,(i-1)}^{PB} - T_{hot,i}^{PB}, \quad (22)$$

где $T_{cool,(i-1)}^{PB}$ – температура ПВ в процессе его движения непосредственно перед его ТК с теплопоглощающей ТЧ i -го ТН; $T_{cool,i}^{PB}$ – температура ПВ в процессе его движения сразу же после его ТК с теплопоглощающей ТЧ i -го ТН; $T_{hot,(i-1)}^{PB}$ – температура ПВ в процессе его движения сразу же после ее ТК с тепловыделяющей ТЧ i -го ТН; $T_{hot,i}^{PB}$ – температура ПВ в процессе его движения непосредственно перед его ТК с тепловыделяющей ТЧ i -го ТН.

Согласно рис. 2 для этого случая исследуемого способа теплообмена обозначим:

$$\Delta T_{cool}^{PB} = \sum_{i=1}^n \Delta T_{cool,i}^{PB} = T_{1,0}^{PB} - T_{1,n}^{PB} = \Delta T_1^{PB}, \quad (23)$$

$$\Delta T_{hot}^{PB} = \sum_{i=1}^n \Delta T_{hot,i}^{PB} = T_{2,0}^{PB} - T_{2,n}^{PB} = \Delta T_2^{PB}; \quad (24)$$

где ΔT_{cool}^{PB} – разность температур ПВ, возникающая вследствие охлаждения ПВ в его входном потоке всеми отдельно взятыми ТН; ΔT_1^{PB} – согласно схеме на рис. 2 разность температур ПВ, возникающая вследствие ТК ПВ в его входном потоке с ТЧ всех отдельно взятых ТН; ΔT_{hot}^{PB} – разность температур ПВ, возникающая вследствие нагрева ПВ в его выходном потоке всеми отдельно взятыми ТН; ΔT_2^{PB} – согласно схеме на рис. 2 разность температур ПВ, возникающая вследствие ТК ПВ в его выходном потоке с ТЧ всех отдельно взятых ТН.

Если использовать соответствующие допущения, в частности, допущение 4, тогда для случая, когда ПВ во входном потоке охлаждается всеми отдельно взятыми ТН, согласно схеме на рис. 2, можно записать:

$$T_{hot,(i-1)}^{PB} = T_{hot,i}^{TH}, \quad (25)$$

$$T_{cool,i}^{PB} = T_{cool,i}^{TH}. \quad (26)$$

Выражения (13) и (14), определяющие соотношение между A_i и B_i , для этого случая исследуемого способа теплообмена согласно рис. 2 и с использованием выражений (22),(25),(26) примут вид:

$$A_i = (B_i - 1) \frac{T_{hot,i}^{PB} + \Delta T_{hot,i}^{PB}}{T_{cool,i}^{PB}} + 1, \quad (27)$$

$$B_i = (A_i - 1) \frac{T_{cool,i}^{PB}}{T_{hot,i}^{PB} + \Delta T_{hot,i}^{PB}} + 1. \quad (28)$$

Преобразуем правые части выражений (15) и (16) с использованием выражений (22), (25), (26):

$$A_i \frac{T_{cool,i}^{TH}}{T_{hot,i}^{TH} - T_{cool,i}^{TH}} = A_i \frac{T_{cool,i}^{PB}}{T_{hot,i}^{PB} + \Delta T_{hot,i}^{PB} - T_{cool,i}^{PB}}, \quad (29)$$

$$B_i \frac{T_{hot,i}^{TH}}{T_{hot,i}^{TH} - T_{cool,i}^{TH}} = B_i \frac{T_{hot,i}^{PB} + \Delta T_{hot,i}^{PB}}{T_{hot,i}^{PB} + \Delta T_{hot,i}^{PB} - T_{cool,i}^{PB}}. \quad (30)$$

Для того, чтобы получить выражение для определения $\Delta T_{hot,i}^{PB}$, в состав которого будет входить множитель A_i с использованием выражения (29) перепишем выражение (15) и получим следующее соотношение:

$$\frac{\Delta T_{cool,i}^{PB}}{\Delta T_{hot,i}^{PB} - \Delta T_{cool,i}^{PB}} = A_i \frac{T_{cool,i}^{PB}}{T_{hot,i}^{PB} + \Delta T_{hot,i}^{PB} - T_{cool,i}^{PB}}. \quad (31)$$

В результате математических преобразований выражения (31) получим следующее соотношение для определения температурного режима работы i -го ТН (выражение, связывающее температуры ПВ до и после его ТК с ТЧ i -го ТН):

$$\Delta T_{hot,i}^{PB} = \frac{T_{hot,i}^{PB} - (1 - A_i) T_{cool,i}^{PB}}{\frac{A_i T_{cool,i}^{PB}}{\Delta T_{cool,i}^{PB}} - 1}. \quad (32)$$

В случае использования ТН, холодильный коэффициент которых задается выражением (9), согласно схеме на рис. 2 суммарный перепад температур ПВ в его выходном потоке на основе выражений (24) и (32):

$$\Delta T_{hot}^{PB} = \sum_{i=1}^n \frac{T_{hot,i}^{PB} - (1 - A_i) T_{cool,i}^{PB}}{\frac{A_i T_{cool,i}^{PB}}{\Delta T_{cool,i}^{PB}} - 1}. \quad (33)$$

Для случая, когда i -й ТН работает по циклу Карно (при этом $A_i = 1$) выражение (32) упростится:

$$\Delta T_{hot,i}^{ПВ} = \frac{T_{hot,i}^{ПВ}}{\frac{T_{cool,i}^{ПВ}}{\Delta T_{cool,i}^{ПВ}} - 1}. \quad (34)$$

В этом случае суммарный перепад температур ПВ в его выходном потоке с учетом выражений (24) и (34) составит:

$$\Delta T_{hot}^{ПВ} = \sum_{i=1}^n \frac{T_{hot,i}^{ПВ}}{\frac{T_{cool,i}^{ПВ}}{\Delta T_{cool,i}^{ПВ}} - 1}. \quad (35)$$

Для того чтобы получить выражение для определения $\Delta T_{hot,i}^{ПВ}$, в состав которого будет входить множитель B_i , с использованием выражения (30) перепишем выражение (16) и получим следующее соотношение:

$$\frac{\Delta T_{hot,i}^{ПВ}}{\Delta T_{hot,i}^{ПВ} - \Delta T_{cool,i}^{ПВ}} = B_i \frac{T_{hot,i}^{ПВ} + \Delta T_{hot,i}^{ПВ}}{T_{hot,i}^{ПВ} + \Delta T_{hot,i}^{ПВ} - T_{cool,i}^{ПВ}}. \quad (36)$$

В результате математических преобразований выражения (36) для определения $\Delta T_{hot,i}^{ПВ}$ получим квадратное уравнение:

$$(1 - B_i)(\Delta T_{hot,i}^{ПВ})^2 + ((1 - B_i)T_{hot,i}^{ПВ} + B_i \Delta T_{cool,i}^{ПВ} - T_{cool,i}^{ПВ})\Delta T_{hot,i}^{ПВ} + B_i T_{hot,i}^{ПВ} \Delta T_{cool,i}^{ПВ} = 0. \quad (37)$$

Такое же самое уравнение также можно получить, если выражение для A_i (27) подставить в выражение (32).

Корень этого квадратного уравнения, имеющий физический смысл, равен:

$$\Delta T_{hot,i}^{ПВ} = \frac{T_{cool,i}^{ПВ} - (1 - B_i)T_{hot,i}^{ПВ} - B_i \Delta T_{cool,i}^{ПВ} - \sqrt{D_{cool,i}}}{2(1 - B_i)}, \quad (38)$$

где $D_{cool,i} = ((1 - B_i)T_{hot,i}^{ПВ} + B_i \Delta T_{cool,i}^{ПВ} - T_{cool,i}^{ПВ})^2 - 4(1 - B_i)B_i T_{hot,i}^{ПВ} \Delta T_{cool,i}^{ПВ}$.

В случае использования ТН, отопительный коэффициент которых задается выражением (10), согласно схеме на рис. 2 суммарный перепад температур ПВ в его выходном потоке по аналогии с выражением (38) составит:

$$\Delta T_{hot}^{ПВ} = \sum_{i=1}^n \frac{T_{cool,i}^{ПВ} - (1 - B_i)T_{hot,i}^{ПВ} - B_i \Delta T_{cool,i}^{ПВ} - \sqrt{D_{cool,i}}}{2(1 - B_i)}. \quad (39)$$

Если i -й ТН в схеме на рис. 2 работает по циклу Карно (при этом $B_i = 1$), то квадратное уравнение (37) приобретет следующий вид:

$$(\Delta T_{cool,i}^{PB} - T_{cool,i}^{PB}) \Delta T_{hot,i}^{PB} + T_{hot,i}^{PB} \Delta T_{cool,i}^{PB} = 0. \quad (40)$$

Из уравнения (40) для определения $\Delta T_{hot,i}^{PB}$ можно получить выражение (34).

Рассмотрим случай, который отвечает допущению 9 (когда все изменения температуры ПВ в результате его ТК с каждой отдельно взятой ТЧ ТН во входном потоке этого ПВ одинаковы) и схема на рис. 2 содержит n ТН. Тогда для такого случая согласно рис. 2 и с использованием выражения (23) найдем:

$$\Delta T_{cool}^{PB} = n \cdot \Delta T_{cool,i}^{PB}. \quad (41)$$

Для случая, когда схема на рис. 2 содержит n ТН, холодильные коэффициенты которых задаются выражением (9), и при этом выполняется допущение 9, суммарный перепад температур ПВ в его выходном потоке с учетом выражений (33), (41) составит:

$$\Delta T_{hot}^{PB} = \sum_{i=1}^n \frac{T_{hot,i}^{PB} - (1 - A_i) T_{cool,i}^{PB}}{\frac{A_i T_{cool,i}^{PB}}{\frac{1}{n} \Delta T_{cool}^{PB}} - 1}. \quad (42)$$

А для случая использования ТН, отопительные коэффициенты которых задаются выражением (10), согласно схеме рис. 2 при использовании допущения 9 суммарный перепад температур ПВ в его выходном потоке с использованием выражений (39), (41) будет равен:

$$\Delta T_{hot}^{PB} = \sum_{i=1}^n \frac{T_{cool,i}^{PB} - (1 - B_i) T_{hot,i}^{PB} - \frac{1}{n} B_i \Delta T_{cool}^{PB} - \sqrt{D_{9,cool,i}}}{2(1 - B_i)}, \quad (43)$$

$$\text{где } D_{9,cool,i} = \left((1 - B_i) T_{hot,i}^{PB} + \frac{1}{n} B_i \Delta T_{cool}^{PB} - T_{cool,i}^{PB} \right)^2 - \frac{4}{n} (1 - B_i) B_i T_{hot,i}^{PB} \Delta T_{cool}^{PB}.$$

Для случая, когда схема на рис.2 содержит n ТН, каждый из которых работает по циклу Карно так, что выполняется допущение 9, учитывая выражения (34) и (41), получим следующее соотношение для определения температурного режима работы i -го ТН:

$$\Delta T_{hot,i}^{PB} = \frac{T_{hot,i}^{PB}}{\frac{T_{cool,i}^{PB}}{\frac{1}{n} \Delta T_{cool}^{PB}} - 1}. \quad (44)$$

Можно показать, что для этого случая *исследуемого способа тепломассообмена*, когда все ТН в схеме на рис. 2 работают по циклу Карно, и когда все изменения температуры ПВ в результате его ТК с каждой отдельно взятой ТЧ ТН во входном потоке этого ПВ одинаковы

(допущение 9), все изменения температуры ПВ в результате его ТК с каждой отдельно взятой ТЧ ТН в выходном потоке этого ПВ также будут одинаковы:

$$\Delta T_{hot,(i-1)}^{PB} = \Delta T_{hot,i}^{PB} \quad (45)$$

Тогда для этого случая с учетом выражений (24), (45) и (44) получим следующее соотношение для определения суммарного перепада температур ПВ в его исходном потоке:

$$\Delta T_{hot}^{PB} = n \cdot \Delta T_{hot,i}^{PB} = \frac{T_{hot,i}^{PB}}{\frac{T_{cool,i}^{PB}}{\Delta T_{cool}^{PB}} - \frac{1}{n}} \quad (46)$$

Если применить непосредственные обозначения схемы на рис. 2, а также выражения (24), (23), (20) и (18), выражение (46) будет иметь вид:

$$\Delta T_2^{PB} = \frac{T_{2,i}^{PB}}{\frac{T_{1,i}^{PB}}{\Delta T_1^{PB}} - \frac{1}{n}} \quad (47)$$

Случай нагрева ПВ в его входном потоке всеми ТН

Схема случая исследуемого способа теплообмена, в котором ПВ в его входном потоке нагревается всеми отдельно взятыми ТН, представлена на рис. 3.

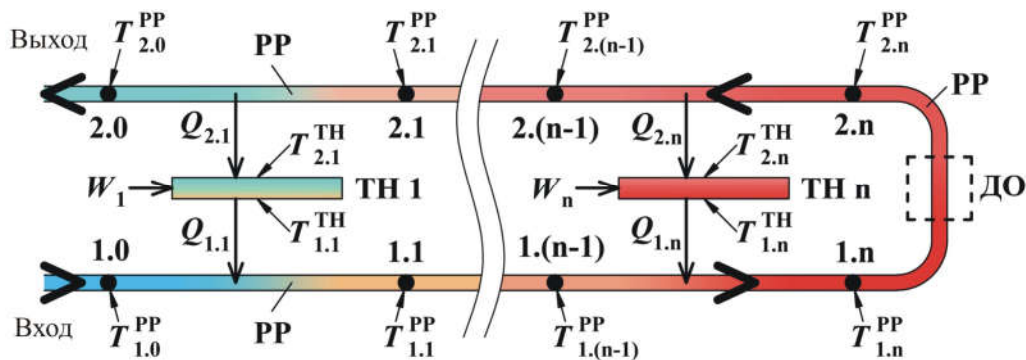


Рис. 3. Схема исследуемого способа теплообмена для случая нагрева ПВ в его входном потоке всеми отдельно взятыми ТН: 1.0, 1.n, 2.n, 2.0 – точки, которые отвечают последовательным положениям ПВ в процессе его движения (1.0 – непосредственно перед ТК ПВ с 1-й (тепловыделяющей) ТЧ ТН 1; 1.1 – сразу же после ТК ПВ с 1-й ТЧ ТН 1; 1.(n-1) – непосредственно перед ТК ПВ с 1-й (тепловыделяющей) ТЧ ТН n; 1.n – сразу же после ТК ПВ с 1-й ТЧ ТН n; 2.n – непосредственно перед ТК ПВ со 2-й (теплопоглощающей) ТЧ ТН n; 2.(n-1) – сразу же после ТК ПВ со 2-й ТЧ ТН n; 2.1 – непосредственно перед ТК ПВ со 2-й (теплопоглощающей) ТЧ ТН 1; 2.0 – сразу же после ТК ПВ со 2-й ТЧ ТН 1); $T_{1,0}^{PB}$, $T_{1,n}^{PB}$, $T_{2,n}^{PB}$, $T_{2,0}^{PB}$ – температуры ПВ в соответствующих точках; $Q_{1,1}$, $Q_{1,n}$ – тепловые потоки от 1-х (тепловыделяющих) ТЧ соответствующих ТН к ПВ; $Q_{2,n}$, $Q_{2,1}$ – тепловые потоки от ПВ ко 2-м (теплопоглощающим) ТЧ соответствующих ТН; $T_{1,1}^{TH}$, $T_{1,n}^{TH}$ – температуры 1-х (тепловыделяющих) ТЧ соответствующих ТН; $T_{2,1}^{TH}$, $T_{2,n}^{TH}$ – температуры 2-х (теплопоглощающих) ТЧ соответствующих ТН; другие обозначения на этом рисунке аналогичны соответствующим обозначениям на предыдущих рисунках.

Для этого случая *исследуемого способа теплообмена*, учитывая то, что ПВ согласно схеме на рис. 3 в ее входном потоке нагревается всеми отдельно взятыми ТН, а в ее исходном потоке охлаждается всеми отдельно взятыми ТН, запишем:

$$T_{hot,i}^{TH} = T_{1,i}^{TH}, \quad i = 1 \div n, \quad (48)$$

$$T_{hot,(i-1)}^{PB} = T_{1,(i-1)}^{PB}, \quad T_{hot,i}^{PB} = T_{1,i}^{PB}, \quad i = 1 \div n, \quad (49)$$

$$T_{cool,i}^{PB} = T_{2,i}^{PB}, \quad i = 1 \div n, \quad (50)$$

$$T_{cool,(i-1)}^{PB} = T_{2,(i-1)}^{PB}, \quad T_{cool,i}^{PB} = T_{2,i}^{PB}, \quad i = 1 \div n, \quad (51)$$

$$\Delta T_{hot,i}^{PB} = T_{hot,i}^{PB} - T_{hot,(i-1)}^{PB}, \quad (52)$$

$$\Delta T_{cool,i}^{PB} = T_{cool,i}^{PB} - T_{cool,(i-1)}^{PB}, \quad (53)$$

где $T_{hot,(i-1)}^{PB}$ – температура ПВ в процессе его движения непосредственно перед ТК с тепловыделяющей ТЧ i -го ТН; $T_{hot,i}^{PB}$ – температура ПВ в процессе его движения сразу же после ТК с тепловыделяющей ТЧ i -го ТН; $T_{cool,(i-1)}^{PB}$ – температура ПВ в процессе его движения сразу же после ТК с *телопоглощающей* ТЧ i -го ТН; $T_{cool,i}^{PB}$ – температура ПВ в процессе его движения непосредственно перед ТК с *телопоглощающей* ТЧ i -го ТН.

Для этого случая *исследуемого способа теплообмена* согласно рис. 3 обозначим:

$$\Delta T_{hot}^{PB} = \sum_{i=1}^n \Delta T_{hot,i}^{PB} = T_{1,n}^{PB} - T_{1,0}^{PB} = \Delta T_1^{PB}, \quad (54)$$

$$\Delta T_{cool}^{PB} = \sum_{i=1}^n \Delta T_{cool,i}^{PB} = T_{2,n}^{PB} - T_{2,0}^{PB} = \Delta T_2^{PB}, \quad (55)$$

где ΔT_{hot}^{PB} – разность температур ПВ, возникающая вследствие нагрева ПВ в его входном потоке всеми отдельно взятыми ТН; ΔT_1^{PB} – согласно схеме рис. 3 разность температур ПВ, возникающая вследствие ТК ПВ в ее входном потоке с ТЧ всех отдельно взятых ТН; ΔT_{cool}^{PB} – разность температур ПВ, возникающая вследствие охлаждения ПВ в его выходном потоке всеми отдельно взятыми ТН; ΔT_2^{PB} – согласно схеме на рис. 3 разность температур ПВ, возникающая вследствие ТК ПВ в ее выходном потоке с ТЧ всех отдельно взятых ТН.

Если использовать соответствующие допущения, в частности, допущение 4, тогда для случая, когда ПВ во входном потоке нагревается всеми отдельно взятыми ТН, согласно схеме на рис.3 можно записать:

$$T_{hot,i}^{PB} = T_{hot,i}^{TH}, \quad (56)$$

$$T_{cool,(i-1)}^{PB} = T_{cool,i}^{PB} \quad (57)$$

Выражения (13) и (14), определяющие соотношение между A_i и B_i , для этого случая исследуемого способа теплообмена согласно рис. 3 и с учетом выражений (53), (56), (57) примут вид:

$$A_i = (B_i - 1) \frac{T_{hot,i}^{PB}}{T_{cool,i}^{PB} - \Delta T_{cool,i}^{PB}} + 1, \quad (58)$$

$$B_i = (A_i - 1) \frac{T_{cool,i}^{PB} - \Delta T_{cool,i}^{PB}}{T_{hot,i}^{PB}} + 1. \quad (59)$$

Подобно тому, как мы получили математические выражения для определения температурного режима работы в соответствии с *исследуемым способом теплообмена* в предыдущем случае, когда ПВ в его входном потоке охлаждается всеми отдельно взятыми ТН согласно рис.2, можно получить также и следующие математические выражения для случая *исследуемого способа теплообмена*, в соответствии с которым ПВ в его входном потоке нагревается всеми отдельно взятыми ТН согласно рис.3.

Для случая использования ТН, отопительные коэффициенты которых задаются выражением (10), согласно схеме на рис. 3 соотношение для определения температурного режима работы i -го ТН имеет следующий вид:

$$\Delta T_{cool,i}^{PB} = \frac{T_{cool,i}^{PB} + (B_i - 1)T_{hot,i}^{PB}}{\frac{B_i T_{hot,i}^{PB}}{\Delta T_{hot,i}^{PB}} + 1}. \quad (60)$$

Для этого же случая суммарный перепад температур ПВ в ее исходном потоке равен:

$$\Delta T_{cool}^{PB} = \sum_{i=1}^n \frac{T_{cool,i}^{PB} + (B_i - 1)T_{hot,i}^{PB}}{\frac{B_i T_{hot,i}^{PB}}{\Delta T_{hot,i}^{PB}} + 1}. \quad (61)$$

В случае использования ТН, холодильный коэффициент которых задается выражением (9), согласно схеме черт. 3 соотношение для определения температурного режима работы i -го ТН таково:

$$\Delta T_{cool,i}^{PB} = \frac{(1 - A_i)T_{cool,i}^{PB} - T_{hot,i}^{PB} - A_i \Delta T_{hot,i}^{PB} + \sqrt{D_{hot,i}}}{2(1 - A_i)}, \quad (62)$$

где $D_{hot,i} = (T_{hot,i}^{PB} - (1 - A_i)T_{cool,i}^{PB} + A_i \Delta T_{hot,i}^{PB})^2 + 4(1 - A_i)A_i \Delta T_{hot,i}^{PB} T_{cool,i}^{PB}$.

Для этого же случая суммарный перепад температур ПВ в его выходном потоке равен:

$$\Delta T_{cool}^{ПВ} = \sum_{i=1}^n \frac{(1 - A_i) T_{cool,i}^{ПВ} - T_{hot,i}^{ПВ} - A_i \Delta T_{hot,i}^{ПВ} + \sqrt{D_{hot,i}}}{2(1 - A_i)}. \quad (63)$$

Для случая, когда i -й ТН работает по циклу Карно, соотношение для определения температурного режима его работы имеет следующий вид:

$$\Delta T_{cool,i}^{ПВ} = \frac{T_{cool,i}^{ПВ}}{\frac{T_{hot,i}^{ПВ}}{\Delta T_{hot,i}^{ПВ}} + 1}. \quad (64)$$

Также для случая, когда i -й ТН работает по циклу Карно, суммарный перепад температур ПВ в ее выходном потоке равен:

$$\Delta T_{cool}^{ПВ} = \sum_{i=1}^n \frac{T_{cool,i}^{ПВ}}{\frac{T_{hot,i}^{ПВ}}{\Delta T_{hot,i}^{ПВ}} + 1}. \quad (65)$$

Для случая, в котором справедливо допущение 9 и схема на рис. 3 содержит n ТН, соотношение между суммарным перепадом температур ПВ в ее входном потоке и перепадом температур ПВ, возникающим вследствие ТК ПВ с тепловыделяющей ТЧ произвольного i -го ТН, имеет вид:

$$\Delta T_{hot}^{ПВ} = n \cdot \Delta T_{hot,i}^{ПВ}. \quad (66)$$

Для случая, когда схема на рис. 3 содержит n ТН, отопительные коэффициенты которых задаются выражением (10), и при этом выполняется допущение 9, суммарный перепад температур ПВ в его исходном потоке равен:

$$\Delta T_{cool}^{ПВ} = \sum_{i=1}^n \frac{T_{cool,i}^{ПВ} + (B_i - 1) T_{hot,i}^{ПВ}}{\frac{B_i T_{hot,i}^{ПВ}}{\frac{1}{n} \Delta T_{hot}^{ПВ}} + 1}. \quad (67)$$

А для случая, когда схема на рис. 3 содержит n ТН, холодильные коэффициенты которых задаются выражением (9), и при этом выполняется допущение 9, суммарный перепад температур ПВ в его исходном потоке определяется так:

$$\Delta T_{cool}^{ПВ} = \sum_{i=1}^n \frac{(1 - A_i) T_{cool,i}^{ПВ} - T_{hot,i}^{ПВ} - \frac{1}{n} A_i \Delta T_{hot}^{ПВ} + \sqrt{D_{9,hot,i}}}{2(1 - A_i)}, \quad (68)$$

$$\text{где } D_{9,hot,i} = \left(T_{hot,i}^{PB} - (1 - A_i) T_{cool,i}^{PB} + \frac{1}{n} A_i \Delta T_{hot}^{PB} \right)^2 + \frac{4}{n} (1 - A_i) A_i \Delta T_{hot}^{PB} T_{cool,i}^{PB}.$$

Для случая, когда схема на рис. 3 содержит n ТН, каждый из которых работает по циклу Карно так, что выполняется допущение 9, соотношение для определения температурного режима работы i -го ТН имеет вид:

$$\Delta T_{cool,i}^{PB} = \frac{T_{cool,i}^{PB}}{\frac{T_{hot,i}^{PB}}{\Delta T_{hot}^{PB}} + 1}. \quad (69)$$

В случае, когда все ТН в схеме на рис. 3 работают по циклу Карно, и когда все изменения температуры ПВ в результате его ТК с каждой отдельно взятой ТЧ ТН во входном потоке этого ПВ одинаковы (допущение 9), все изменения температуры ПВ в результате его ТК с каждой отдельно взятой ТЧ ТН в выходном потоке этого ПВ также одинаковы:

$$\Delta T_{cool,(i-1)}^{PB} = \Delta T_{cool,i}^{PB}. \quad (70)$$

Для этого же случая суммарный перепад температур ПВ в его исходном потоке:

$$\Delta T_{cool}^{PB} = n \cdot \Delta T_{cool,i}^{PB} = \frac{T_{cool,i}^{PB}}{\frac{T_{hot,i}^{PB}}{\Delta T_{hot}^{PB}} + \frac{1}{n}}. \quad (71)$$

С использованием непосредственных обозначений схемы на рис. 3 выражение (71) имеет вид:

$$\Delta T_2^{PB} = \frac{T_{2,i}^{PB}}{\frac{T_{1,i}^{PB}}{\Delta T_1^{PB}} + \frac{1}{n}}. \quad (72)$$

Выводы

1. Получены математические выражения для оценки эффективности использования исследуемого способа тепломассообмена для создания и поддержания разности температур между разными частями ПВ.
2. Из предварительного анализа этих математических выражений можно сделать вывод о принципиальной возможности использования по крайней мере двух ТН вместо одного ТН в схемах на рис.2 и рис.3 для повышения энергоэффективности соответствующих энергозатратных процессов тепломассообмена.
3. В то же время для принятия решений относительно практических применений описанного здесь способа тепломассообмена могут понадобиться дальнейшие теоретические и/или экспериментальные исследования.

Литература

1. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. Сравнительный анализ термоэлектрических и компрессионных тепловых насосов для индивидуальных кондиционеров. *Термоэлектричество*. 2016. №2. С.33-42.
2. Bonin J. *Heat Pump Planning Handbook*. London and New York, Routledge, 2015. 326 p.
3. Анатычук Л.И., Прибыла А.В., Розвер Ю.Ю. Экспериментальное исследование термоэлектрического теплового насоса жидкость-жидкость. *Термоэлектричество*. 2017. №3. С.47-53.
4. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. О предельных возможностях термоэлектрического теплового насоса жидкость-жидкость. *Термоэлектричество*. 2017. №4. С.49-54.
5. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. О влиянии качества теплообменников на свойства термоэлектрических тепловых насосов жидкость-жидкость. *Термоэлектричество*. 2017. №5. С.59-64.
6. Гаврилюк Н.В., Константинович И.А. Термоэлектрический прибор для электрофореза. *Научный вестник Черновицкого университета*. 2013. Том 3, выпуск 1. *Физика. Электроника*. С.33-42.
7. Lee Hosung *Thermoelectrics : design and materials*. Chichester, UK ; Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2016. 440 p.
8. Alves-Filho O. *Heat Pump Dryers. Theory, Design and Industrial Applications*. Boca Raton, CRC Press, 2015. 345 p.
9. Акулич П. В. *Расчеты сушильных и теплообменных установок*. Минск, Беларус. наука, 2010. 443 с.
10. Снежкин Ю. Ф., Чалаев Д. М., Шапарь Р. А., Дабижа Н. А. Особенности использования тепловых насосов в процессах сушки. Материалы научно-технической конференции «Теплонасосные технологии в Украине. Состояние и перспективы внедрения» (23–25 мая 2012, г. Киев), *Электронный журнал ЭСКО*. 2012. №6. http://journal.esco.co.ua/2012_6/art365.pdf
11. Снежкин Ю. Ф., Пазюк В. М., Петрова Ж. О., Чалаев Д. М. *Теплонасосная зерносушилка для семенного зерна*. Киев, ООО «Полиграф-Сервис», 2012. 154 с.
12. *Patent US 9700835 B2*. Barnwell J.W. Thermoelectric compressed air and/or inert gas dryer.
13. *Patent US 4065936 A*. Fenton J.W., Lee J.S., Buist R.J. Counter flow thermoelectric heat pump with discrete sections.
14. Кшевецкий О. С. Оценка энергоэффективности образа тепломассообмена между подвижным веществом и тепловыми насосами. Материалы Всеукраинской научно-практической конференции “Инновационные технологии в гостинично-ресторанном бизнесе” (22-23 марта 2017, г. Киев), Киев, НУХТ, 2017. С.172-174.
15. Кшевецкий О. С. О возможности повышения энергоэффективности процессов тепломассообмена, предусматривающих нагревание и охлаждение подвижного вещества. *Chemical Technology and Engineering (Химическая технология и инженерия): сборник тезисов докладов Международной научно-практической конференции (26-30 июня 2017, г. Львов)*, Львов, Издательство Львовской политехники, 2017. С.96-97.
16. Кшевецкий О. С., Штангеева Н. И. О возможности использования нескольких тепловых насосов для повышения энергоэффективности некоторых процессов тепломассообмена. Тезисы докладов X-й Международной конференции «Проблемы

теплофизики и теплоэнергетики» (23–26 мая 2017 г. Киев, Украина), *Промышленная теплотехника*. 2017. Том 39, №7. С.79-80.

Поступила в редакцию: 03.01.2018

O.S. Kshevetsky PhD in Physics and Mathematics, assistant professor

Chernivtsi Institute of Trade and Economics of Kyiv National
University of Trade and Economics, 7, Tsentralna Square, Chernivtsi,
58002, Ukraine, e-mail: kshevos@gmail.com

ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF PARTIAL CASE OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES BETWEEN HEAT PUMPS AND MOVING SUBSTANCE, PART 1

Mathematical expressions have been obtained for estimation of the efficiency of partial case of heat and mass transfer between moving substance and heat pumps with their heat exchangers, whereby moving substance (or at least part of this moving substance) is brought into thermal contact with the heat absorbing and heat releasing heat exchangers of at least two real heat pumps. Bibl. 16, Fig. 3.

Key words: heat pump, thermoelectric heat pump, moving substance, heat and mass transfer, efficiency, energy efficiency.

References

1. Anatyчук L.I., Prybyla A.V. (2016). Comparative analysis of thermoelectric and compression heat pumps for individual air-conditioners. *J. Thermoelectricity*, 2, 33–42.
2. Bonin J. (2015). *Heat pump planning handbook*. London and New York: Routledge.
3. Anatyчук L.I., Prybyla A.V., Rozver Yu.Yu. (2017). Experimental study of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J. Thermoelectricity*, 3, 47–53.
4. Anatyчук L.I., Prybyla A.V. (2017). Limiting possibilities of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J. Thermoelectricity*, 4, 49–54.
5. Anatyчук L.I., Prybyla A.V. (2017). The influence of quality of heat exchangers on the properties of thermoelectric liquid-liquid heat pumps. *J. Thermoelectricity*, 5, 59–64.
6. Havryliuk M.V., Konstantynovych I.A. (2013). Termoelektrychnyi prylad dlia elektroforezu [Thermoelectric device for electrophoresis]. *Naukovyi visnyk Chernivetskoho Universitetu. Fyzyka. Elektronika – Scientific Bulletin of Chernivtsi University. Physics. Electronics*, 3(1), 33-42 [in Ukrainian].
7. Lee HoSung. (2016). *Thermoelectrics: design and materials*. Chichester, UK; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
8. Alves-Filho O. (2015). *Heat pump dryers. Theory, design and industrial applications*. Boca Raton: CRC Press.

9. Akulich P.V. (2010). *Raschioty sushilnykh i teploobmennykh ustanovok [Calculations of drying and heat exchange installations]*. Minsk: Belarus navuka [in Russian].
10. Snezhkin Yu.F., Chalaiev D.M., Shapar R.A., Dabizha N.A. (2012). Osobennosti ispolzovaniia teplovykh nasosov v processakh sushki [Peculiarities of using heat pumps in drying processes].” *Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii “Teplonasosnyie tekhnologii v Ukraine. Sostoiannie i perspektivy vnedreniia” – Proc. of scientific and practical conference “Heat pump technologies in Ukraine. Current state and introduction prospects (Ukraine, Kyiv, May 23–25, 2012). Electronic journal ESCO, 6.* http://journal.esco.co.ua/2012_6/art365.pdf
11. Snezhkin Yu.F., Paziuk V.M., Petrova Zh.O., Chalaiev D.M. (2012). *Teplonasosna zernosusharka dlia nasinnevoho zerna [Heat pump grain dryer for seed grain]*. Kyiv: TOV Poligraph-Service [In Ukrainian].
12. Patent US 9700835 B2. Barnwell J.W. Thermoelectric compressed air and/or inert gas dryer.
13. Patent US 4065936 A. Fenton J.W., Lee J.S., Buist R.J. Counter flow thermoelectric heat pump with discrete sections.
14. Kshevetsky O.S. (2017). Otsinka energoefektyvnosti sposobu teplomasoobminu mizh rukhomoiu rechovynoiu i tepolvymy nasosamy [Estimation of energy efficiency of a method for heat and mass transfer between moving substance and heat pumps]. *Materialy Vseukrainskoi naukovopraktychnoi konferentsii “Innovatsiini tekhnologii v hotelno-restorannomu biznesi” – Proc. of All-Ukrainian scientific and practical conference “Innovation technologies in hotel and restaurant business” (Ukraine, Kyiv, March 22–23). Kyiv: NUFT [in Ukrainian].*
15. Kshevetsky O.S. (2017). Pro mozhlyvist pidvyshchennia enerhoefektyvnosti procesiv teplomasoobminu, yaki peredbachaiut nahrivannia ta okholodzhennia rukhomoii rechovyny [On the possibility of increasing the energy efficiency of heat and mass transfer processes which involve heating and cooling of moving substance]. *Khimichna tekhnologiiia ta inzheneriia: zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii - Chemical Technology and Engineering: collection of abstracts of International scientific and practical conference (Ukraine, Lviv, June 26–30, 2017). Lviv: Lvivska Politekhnikha [in Ukrainian].*
16. Kshevetsky O.S., Shtangeieva N.I. (2017). Pro mozhlyvist vykorystannia dekilkokh teplovykh nasosiv dlia pidvyshchennia enerhoefektyvnosti deiakykh procesiv teplomasoobminu [On the possibility of using several heat pumps for increasing energy efficiency of some heat and mass transfer processes]. Tezy dopovidei X Mizhnarodnoi konferentsii “Problemy teplofizyky ta teploenerhetyky” – Abstracts of X International conference “Problems of thermophysics and heat power engineering” (Ukraine, Kyiv, May 23–26, 2017). *Promyshlennaia teplotekhnika – Industrial Heat Engineering, 39(7), 79–80 [in Ukrainian].*

Submitted 03.01.2018