

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.04.047>

УДК 620.31

Б.И. Басок, С.В. Дубовской, А.С. Твердохлиб

Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев

E-mail: s.w.dubovskoy@gmail.com

Энергетическая эффективность комбинированного производства теплоты и холода

Представлено членом-корреспондентом НАН Украины Б.И. Баском

Описан новый метод разделения затрат энергии при комбинированном производстве теплоты и холода, основанный на термодинамическом подходе. Приведены соотношения для расчета коэффициентов продуктивности охлаждения и нагрева в комбинированном режиме.

Ключевые слова: комбинированное производство теплоты и холода, разделение затрат, термодинамический метод, коэффициент продуктивности.

В последние годы в мире получают широкое распространение энергоэффективные системы энергообеспечения промышленных процессов, жилых и гражданских зданий, базирующиеся на применении комбинированного производства теплоты и холода (КПТХ) [1, 2]. Директивой 2012/27 ЕС, принятой к исполнению в Украине, развитие технологий тепло- и хладоснабжения, в том числе на основе КПТХ, отнесено к числу ключевых направлений повышения энергоэффективности экономики и социальной сферы.

Очевидным преимуществом КПТХ перед обычными холодильными и теплогенерирующими установками является возможность полезного использования сбросной теплоты, получаемой при работе холодильных машин с определенными дополнительными затратами приводной энергии на повышение ее температурного потенциала. Однако это само по себе не является гарантией того, что удельные затраты энергии, стоимость и экологические издержки на получение как теплоты, так и холода будут меньшими, чем у более совершенных холодильных машин, тепловых насосов или генераторов теплоты на дешевом топливе [3]. В связи с этим применение КПТХ нуждается в тщательном технико-экономическом обосновании, базирующемся на отдельной оценке эффективности получения теплоты и холода. Для КПТХ, как и для других систем комбинированного производства видов энергии, объективно оценить показатели эффективности сложно из-за несовершенства известных расчетных методов разделения затрат приводной энергии между продуктами таких комбинированных процессов [4]. Поскольку это сдерживает применение КПТХ на практике, необходимы дальнейшие исследования, направленные на совершенствование методов объек-

тивной оценки энергетических характеристик установок и устройств комбинированного производства теплоты и холода.

Постановка задачи. Среди многих подходов к разделению затрат энергии между продуктами комбинированных процессов наибольшего внимания заслуживает термодинамический подход, основанный на втором начале термодинамики. Методология разделения затрат энергии в рамках термодинамического подхода рассматривалась в работах З. Ранга [4], Я. Шаргута и Р. Петелы [5], В.М. Бродянского [6] и др. Важный прикладной результат исследований в данной области, известный как эксергетический метод разделения затрат, был получен Р. Нитчем [7].

В терминах эксергетического метода задача разделения затрат приводной энергии сводится к промежуточной задаче разделения затрат эксергии приводной энергии (в дальнейшем — приводной эксергии), исходя из уравнения эксергетического баланса многопродуктового процесса:

$$\sum_{i=1}^N E_i^o = E_o = \sum_{i=1}^N E_i + D, \quad (1)$$

где N — количество продуктов; i — условный порядковый номер продукта; E_i — эксергия каждого продукта; E_i^o — искомая затрата эксергии приводной энергии на получение соответствующего продукта; D — потери эксергии; E_o — эксергия приводной энергии или приводная эксергия процесса.

Из (1) следует, что в случае термодинамически обратимого комбинированного процесса ($D = 0$) затрата приводной эксергии на получение каждого его продукта совпадает с эксергией продукта:

$$E_i^o = E_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (2)$$

Получение столь же точного соотношения для реальных процессов ($D > 0$) нуждается в поиске дополнительных оснований для разделения потерь эксергии D . Отметив отсутствие таковых в рамках эксергетического подхода, Р. Нитч допустил возможность их замены гипотезой о разделении потерь эксергии пропорционально эксергии продуктов, предложив обобщенную формулу разделения в виде [7]

$$E_i^o = E_i \frac{E_o}{\sum_{i=1}^N E_i}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (3)$$

В идеальном случае ($D = 0$) дробь в правой части (3) тождественна 1, что переводит (3) в (2), а для реальных процессов ($D > 0$) эта дробь представляет собой величину, обратную полному эксергетическому КПД. В силу этого соотношение (3) приобретает вид [7]

$$E_i^o = \frac{E_i}{\eta_e}, \quad (4)$$

где $\eta_e = \frac{\sum_{i=1}^N E_i}{E_o}$ — полный эксергетический КПД процесса.

Таким образом, согласно гипотезе Р. Нитча, приходим к выводу о равной эффективности получения всех продуктов вне зависимости от физической природы комбинированного процесса и его продуктов.

Полученные соотношения позволили получить соответствующие формулы разделения затрат приводной энергии процесса в виде [7, 8]

$$L_i = L \frac{E_i}{\sum_{i=1}^N E_i}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (5)$$

где L_i — искомые затраты приводной энергии на получение каждого продукта; $L = \sum_{i=1}^N L_i$ — полная приводная энергия многопродуктового процесса.

Простота, наглядность и универсальность полученных формул определяет удобство использования метода, в том числе для технико-экономического анализа КПТХ [5]. Однако достоверность количественных оценок данным методом иногда не дает достаточных оснований для принятия практических решений, что сужает область его возможного использования [6]. Это обстоятельство определяет необходимость возврата к поиску более аргументированных оснований для разделения потерь эксергии с отказом от базовой гипотезы Р. Нитча [7].

Попытка такого рода предпринята авторами в работах [9, 10]. Она базируется на обоснованном ранее утверждении о том, что эксергия, как вид безэнтропийной энергии, подчиняется общему закону сохранения и превращения механической энергии, в частности закону Джоуля—Майера об эквивалентном переходе энергии в теплоту [9].

Анализ реальных процессов комбинированного производства теплоты и холода с совместным применением уравнений сохранения энергии, первого и второго начал термодинамики, позволил получить общие соотношения для разделения потерь эксергии, а также приводной эксергии таких процессов в виде [10]

$$D_h = D \frac{\tau_h}{\tau_c + \tau_h}, \quad D_c = D \frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_h}, \quad (6)$$

$$E_c^o = E_c + D \frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_h}, \quad E_h^o = E_h + D \frac{\tau_h}{\tau_c + \tau_h}. \quad (7)$$

Здесь E_c^o , E_h^o — искомые затраты приводной эксергии на получение холода и теплоты; $E_c = Q_c \tau_c$ — эксергия холода; $E_h = Q_h \tau_h$ — эксергия теплоты; Q_c, Q_h — холодопродуктивность и теплопродуктивность комбинированного процесса; τ_c, τ_h — соответствующие температурные эксергетические функции.

Обоснование нового метода разделения затрат. Цель настоящей работы — приведение полученных формул (7) к более простому виду, удобному для уяснения физической сути и для практических расчетов комбинированного производства теплоты и холода.

Поскольку эксергия E^o и электромеханическая энергия привода L численно совпадают, потеря эксергии комбинированного процесса может быть выражена в виде

$$D = L - E_h - E_c. \quad (8)$$

Полная затрата энергии процесса, в свою очередь, может быть определена из уравнения энергетического баланса:

$$L = Q_h - Q_c. \quad (9)$$

Подставив (8) и (9) в (6, 7), получим:

$$\begin{aligned} L_c &= Q_c \tau_c + (L - Q_h \tau_h - Q_c \tau_c) \frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_h} = \\ &= \frac{Q_c \tau_c \tau_h + L \tau_c - Q_h \tau_c \tau_h}{\tau_c + \tau_h} = \frac{L \tau_c - (Q_h - Q_c) \tau_c \tau_h}{\tau_c + \tau_h} = L \frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_h} (1 - \tau_h), \end{aligned} \quad (10)$$

$$L_h = Q_h \tau_h + (L - Q_h \tau_h - Q_c \tau_c) \frac{\tau_h}{\tau_c + \tau_h} = \frac{L \tau_h + (Q_h - Q_c) \tau_c \tau_h}{\tau_c + \tau_h} = L \frac{\tau_h}{\tau_c + \tau_h} (1 + \tau_c). \quad (11)$$

Эксергетические температурные функции выражаются через температурные параметры процесса в виде [8]

$$\tau_h = \frac{T_h - T_a}{T_h}, \quad \tau_c = \frac{T_a - T_c}{T_c}, \quad (12)$$

где T_c, T_h – температуры извлечения теплоты (охлаждения) и отпуска теплоты (нагрева) соответственно; T_a – температура окружающей среды.

С учетом (12) соотношения (10), (11) упрощаются к виду

$$L_c = L \frac{T_a - T_c}{T_c} \frac{T_c T_h}{T_a T_h - T_c T_h + T_c T_h - T_a T_c} \left(1 - \frac{T_h - T_a}{T_h} \right) = L \frac{T_a - T_c}{T_h - T_c}, \quad (13)$$

$$L_h = L \frac{T_h - T_a}{T_h} \frac{T_c T_h}{T_a T_h - T_c T_h + T_c T_h - T_a T_c} \left(1 + \frac{T_a - T_c}{T_c} \right) = L \frac{T_h - T_a}{T_h - T_c}. \quad (14)$$

Из полученных соотношений следует, что затраты приводной энергии на получение холода и теплоты пропорциональны модулям избыточных температур извлечения и отдачи теплоты:

$$\frac{L_c}{L_h} = \frac{\theta_c}{\theta_h}, \quad (15)$$

где $\theta_h = T_h - T_a$, $\theta_c = |T_a - T_c|$ – абсолютные значения избыточных температур.

Выражения (13)–(15) справедливы для процессов с произвольной степенью обратимости, и в случае полной обратимости ($D = 0$) они должны сводиться к частному решению (1).

Чтобы убедиться в этом, следует учесть, что в обратимом случае полная приводная энергия может быть выражена двумя равноценными формулами:

$$L = Q_c \frac{T_h - T_c}{T_c}, \quad L = Q_h \frac{T_h - T_c}{T_h}. \quad (16)$$

После подстановки данных формул в (13) и (14) нетрудно получить

$$L_c = E_c^o = Q_c \frac{T_h - T_c}{T_c} \frac{T_a - T_c}{T_h - T_c} = Q_c \frac{T_a - T_c}{T_c} = Q_c \tau_c = E_c,$$

$$L_h = E_c^o = Q_h \frac{T_h - T_c}{T_h} \frac{T_h - T_a}{T_h - T_c} = Q_h \frac{T_h - T_a}{T_h} = Q_h \tau_h = E_h,$$

что соответствует эксергетическому закону разделения (1) при $D = 0$.

Область применения полученных соотношений. Полученные соотношения применимы к холодильным машинам и тепловым насосам разных типов с электромеханическим приводом. Границы рассмотрения анализируемых процессов ограничены внутренней поверхностью тепловоспринимающих и теплоотдающих поверхностей, а также приводным валом (клеммами) приводного устройства. В качестве температур T_c и T_h следует рассматривать температуры испарения и конденсации рабочих тел компрессионных машин, теплоотдающих и тепловоспринимающих пластин термоэлектрических батарей и т. д. Температура окружающей среды T_a выбирается исходя из конкретной задачи расчета.

Коэффициенты продуктивности комбинированного режима. Эффективность получения теплоты и холода кондиционерами и тепловыми насосами с электромеханическим приводом характеризуют коэффициентами теплопродуктивности (индекс h) и холодопродуктивности (индекс c):

$$COP_h = \frac{Q_h}{L}, \quad COP_c = \frac{Q_c}{L}. \quad (17)$$

Эти показатели, определяемые стандартными методами, позволяют рассчитать количество получаемой теплоты и/или холода по величине затраченной энергии вне зависимости от того, используется или нет один из продуктов. При производстве одного целевого продукта и невозможности использования другого данные показатели позволяют решить и обратную задачу — оценить удельные затраты конечной энергии на получение основного продукта, а затем и его производственную стоимость. Однако при использовании, а также при оценках целесообразности использования второго (вспомогательного) продукта возникает необходимость применения соответствующих коэффициентов продуктивности комбинированного режима, основанных на предварительном разделении затрат энергии по продуктам:

$$COP_h^* = \frac{Q_h}{L_h}, \quad COP_c^* = \frac{Q_c}{L_c}. \quad (18)$$

С учетом (13)—(15) данные коэффициенты могут быть определены по известным значениям коэффициентов тепло- и холодопродуктивности:

$$COP_c^* = COP_c k_c, \quad COP_h^* = COP_h k_h, \quad (19)$$

где k_c , k_h — коэффициенты, отражающие повышение эффективности, при комбинированном производстве, определяемые по формулам

$$k_c = 1 + \frac{\theta_h}{\theta_c}, \quad k_h = 1 + \frac{\theta_c}{\theta_h}. \quad (20)$$

Из полученных соотношений видно, что коэффициенты продуктивности комбинированного режима всегда выше, чем соответствующие стандартные коэффициенты продуктивности.

Таким образом, на основании термодинамического анализа КПТХ с привлечением закона сохранения энергии получен общий закон распределения затрат приводной энергии на получение теплоты и холода при их комбинированном производстве. Установлено, что соответствующие затраты пропорциональны абсолютным значениям избыточных температур отдачи теплоты (нагрева) и извлечения теплоты (охлаждения). Представлены выражения для расчета коэффициентов теплопродуктивности и холодопродуктивности комбинированного производства теплоты и холода. Полученные результаты могут быть использованы для отдельных оценок показателей энергоемкости, экономических и экологических характеристик комбинированного производства теплоты и холода.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Andrews D., Krook Riekkola A., Tzimas E., Serpa J., Carlsson J., Pardo-Garcia N., Papaioannou I. Background Report on EU-27 district heating and cooling potentials, barriers, best practice and measures of promotion. Report EUR 25289EN. Luxemburg: Publ. Office of the European Union, 2012. 215 p.
2. Басок Б.И., Резакова Т.А., Коломейко Д.А., Матвеев Ю.Б. Когенерация в децентрализованной и возобновляемой энергетике. Киев, 2013. 408 с.
3. Братута Э.Г., Шерстюк В.Г. Производство холода и теплоты в схемах энергетического взаимодействия холодильных и теплонасосных установок. Интернет-газета "Холодильщик". 2009. № 2. URL: http://www.holodilshchik.ru/index_holodilshchik_issue_2_2009_Production_chil_heats.htm
4. Петросян А.Л. Метод оценки энергетической эффективности теплонасосных установок. *Новости теплоснабжения*. 2011. № 12. С. 19–22.
5. Rant Z. Vrednost in obracunavanje energije. *Strojinski Vestnik* 1. 1955. № 1. S. 4–7.
6. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. Москва: Энергия, 1968. 278 с.
7. Нитч Р. Эксергетическое разделение затрат комбинированной выработки тепла и электрической энергии и введение эксергетического тарифа на тепло для отопления. *Энергия и эксергия*: Бродянский В.М. (ред.). Москва: Мир, 1968. С. 106–121.
8. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
9. Дубовський С.В. Енергоекономічний аналіз сполучених систем генерації електричної енергії і теплоти. Київ: Наук. думка, 2014. 181 с.
10. Дубовський С.В., Твердохліб О.С. Термодинамічний аналіз систем комбінованого виробництва теплоти та холоду. *Проблеми загальної енергетики*. 2014. Вип. 2. С. 46–51.

Поступило в редакцию 24.11.2017

REFERENCES

1. Andrews, D., Krook Riekkola, A., Tzimas, E., Serpa, J., Carlsson, J., Pardo-Garcia, N. & Papaioannou, I. (2012). Background Report on EU-27 district heating and cooling potentials, barriers, best practice and measures of promotion. Report EUR 25289EN. Luxemburg: Publ. Office of the European Union.
2. Basok, B.I., Rezakova, T.A., Kolomeyko, D.A. & Matveev, Yu.B. (2013). Cogeneration in decentralized and renewable energy. Kiev (in Russian).
3. Bratuta, E. G. & Sherstyuk, A. V. (2009). Production of cold and heat in schemes of energy interaction of refrigeration and heat pump plants. Internet-Newspaper "Kholodilshchik", No. 2 (in Russian). Retrieved from http://www.holodilshchik.ru/index_holodilshchik_issue_2_2009_Production_chil_heats.htm
4. Petrosyan, A. L. (2011). Method for assessing the energy efficiency of heat pump plants. *Novosti teplosnabzheniya*, No. 12, pp. 19-22 (in Russian).

5. Rant, Z. (1955). Vrednost in obracunavanje energije. Strojinski Vestnik 1, No. 1, pp. 4-7.
6. Shargut, J. & Petala, R. (1968). Exergy. Moscow: Energiya (in Russian).
7. Nitsch, R. (1968). Exergy cost sharing combined heat and power and the introduction of exergy heat tariff for heating. In Brodyanskiy V.M. (Ed.). Energy and exergy (pp. 106-121). Moscow: Mir (in Russian).
8. Brodyanskiy, V. M., Fratsher, V. & Mihalek, K. (1988). Exergy method and its application. Moscow: Energoatomizdat (in Russian).
9. Dubovskyi, S. V. (2014). Energy-economic analysis of interconnected systems of electric energy and heat generation. Kiev: Naukova dumka (in Ukrainian).
10. Dubovskyi, S. V. & Tverdohlib, A. S. (2014). Thermodynamic analysis of combined heat and cold generation systems. Problemy Zahalnoi Enerhetyky, Iss. 2, pp. 46-51 (in Ukrainian).

Received 24.11.2017

В.І. Басок, С.В. Дубовський, О.С. Твердохліб

Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ
E-mail: s.w.dubovskoy@gmail.com

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ КОМБІНОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА ТЕПЛОТИ І ХОЛОДУ

Описано новий метод поділу витрат енергії під час комбінованого виробництва теплоты і холоду, заснований на термодинамічному підході. Наведено співвідношення для розрахунку коефіцієнтів продуктивності охолодження і нагрівання в комбінованому режимі.

Ключові слова: комбіноване виробництво теплоты і холоду, розділення витрат, термодинамічний метод, коефіцієнт продуктивності.

V.I. Basok, S.V. Dubovskyi, O.S. Tverdokhlib

Institute of Engineering Thermophysics of the NAS of Ukraine, Kiev
E-mail: s.w.dubovskoy@gmail.com

ENERGY EFFICIENCY OF COMBINED COLD AND HEAT PRODUCTION

A new method based on the thermodynamic approach is presented for the separation of energy costs in the combined production of heat and cold. Relations are given for calculating the coefficients of performance for cooling and heating in the combined mode.

Keywords: combined production of heat and cold, cost-sharing, thermodynamic method, coefficient of performance.