

УДК 697.34(0.75):621.1.016.7

DOI: 10.30838/P.СММ.2415.250918.201.152

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСЕРГІЇ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ, ЩО КОНТАКТНО ЗМІШУЮТЬСЯ

ДЕНЬГУБ В.І.^{1*}, к.т.н, доц.

^{1*} Кафедра теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляції. Криворізький національний університет, вул. В.Матусевича 11, м. Кривий Ріг 50027, Україна, тел +38(056)409-06-06, e-mail: vitdengub@gmail.com; ORCID ID: 0000-0003-0380-2466

Мета. Метою досліджень є оцінка роботоспроможності водоводяних і пароводяних теплообмінників змішування в системах гарячого водопостачання при відсутності скидної води і використанні конденсату пари в теплообмінниках. З раніше відомих публікацій інших дослідників відомі результати оцінки ексергетичного ККД (ЕККД) теплообмінників для підготовки гарячого водопостачання за ланцюгом: енергетичні витрати палива – теплообмінник – отримана енергія гарячої води. При цьому розглянуті випадки: а) без використання скидної води; б) з використанням енергії скидної води; в) з використанням теплового насоса. Але при цьому окремо не виділена ексергетична оцінка процесу теплообміну в самих теплообмінниках, що і послужило причиною написання даної статті. **Методика.** Побудована на основі відношень циклів Карно отримання однакової кількості теплоти холодним теплоносієм до відданої такої ж кількості гарячим теплоносієм. Але через різницю температур при обміні теплотою за теоремою Гюї-Стодоли відбувається втрата ексергії як при віддачі теплоти, так і при її сприйнятті більш холодним теплоносієм. З врахуванням енергії, якою обмінюються «гарячі» та «холодні» потоки середовищ в теплообміннику при контактах, були розраховані ЕККД. **Результати.** Встановлено, що в «відкритих» теплових мережах термічний ККД співпадає з ЕККД і дорівнює одиниці. Для пароводяних апаратів змішування ЕККД змінюється в межах 0,96-0,98 і залежить від тиску пари та її температури насичення. **Наукова новизна.** Запропонована термодинамічна модель оцінки ексергетичної ефективності безпосередньо конструкцій теплообмінників з потоками теплоти, що між собою перемішуються. **Практична значимість.** При можливості бажано переходити до відкритих теплових мереж для житлово-комунального сектору з водоводяними теплообмінниками. При неможливості переходу до відкритих систем для індивідуальних теплових пунктів найбільш ексергетично вигідним є використання електричних бойлерів.

Ключові слова: ексергія; змішувальні теплообмінники; гаряче водопостачання; теплові мережі.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСЕРГИИ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ, КОТОРЫЕ КОНТАКТНО СМЕШИВАЮТСЯ

ДЕНЬГУБ В.И.^{1*}, к.т.н, доц.

^{1*} Кафедра теплогазоводоснабжения, водоотведения и вентиляции. Криворожский национальный университет, ул. В.Матусевича 11 г. Кривой Рог, Украина, тел +38(056)409-06-06, e-mail: vitdengub@gmail.com; ORCID ID: 0000-0003-0380-2466

Цель. Целью исследований является оценка работоспособности водоводяных и пароводяных теплообменников смешивания в системах горячего водоснабжения при отсутствии сбросной воды и использовании конденсата пара в теплообменниках. Из ранее известных публикаций других исследователей известны результаты оценки эксергетического КПД (ЭКПД) теплообменников для подготовки горячего водоснабжения по цепочке: энергетические затраты топлива - теплообменник - полученная энергия горячей воды. При этом рассмотрены случаи: а) без использования сбросной воды; б) с использованием энергии сбросной воды; в) с использованием теплового насоса. Но при этом отдельно не выделена эксергетическая оценка процесса теплообмена в самых теплообменниках, что и послужило причиной написания данной статьи. **Методика.** Построена на основе отношений циклов Карно получения одинакового количества теплоты холодным теплоносителем к отданной такого же количества горячим теплоносителем. Но из-за разницы температур при обмене теплотой по теореме Гюи-Стодоли происходит потеря эксергии как при отдаче теплоты, так и при ее восприятии более холодным теплоносителем. С учетом энергии, которой обмениваются «горячие» и «холодные» потоки в теплообменнике при контактах, были рассчитаны ЭКПД. **Результаты.** Установлено, что в «открытых» тепловых сетях термический КПД совпадает с ЭКПД и равен единице. Для пароводяных аппаратов смешивания ЭКПД изменяется в пределах 0,96-0,98 и зависит от давления пара и его температуры насыщения. **Научная новизна.** Предложенная термодинамическая модель оценки эксергетической эффективности непосредственно конструкций теплообменников с потоками теплоты, между собой перемешиваются. **Практическая значимость.** При возможности желательно переходить к открытым тепловым сетям для жилищно-коммунального сектора с водоводяными теплообменниками. При невозможности перехода к открытым системам для индивидуальных тепловых пунктов наиболее эксергетической выгодным является использование электрических бойлеров.

Ключевые слова: эксергии; смесительные теплообменники; горячее водоснабжение; тепловые сети.

INVESTIGATION OF THERMAL FLOWS EXCHANGED BY CONTACT MOVING

DENHUB V.I.^{1*}, Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof.

^{1*} Department of heat and gas supply, drainage and ventilation. Kryvyi Rih National University, st. V. Matusевич 11, Kryvyi Rih, Ukraine, phone +38(056)409-06-06, e-mail: vitdengub@gmail.com; ORCID ID: 0000-0003-0380-2466

Purpose. The aim of the research is to assess the water and sewage mixing heat exchangers' efficiency in hot water supply systems in the absence of waste water and the use of steam condensate in heat exchangers. From the previously known publications of other researchers, the results of the estimation of exergent efficiency (EE) of heat exchangers for the preparation of hot water supply along the chain are known: energy consumption of fuel - heat exchanger - the received hot water energy. In this case, cases are considered: a) without the use of waste water; b) using waste water energy; c) using a heat pump. In this case, cases are considered: a) without the use of waste water; b) using waste water energy; c) using a heat pump. But at the same time, the exergy evaluation of the heat transfer process in the heat exchangers itself is not singled out, which was the reason for the writing of this article. **Method.** It is constructed on the basis of Carnot's ratios of obtaining the same amount of heat by a cold coolant to a given amount of hot coolant. But because of the temperature difference in heat exchange, according to the Gui-Stodol's theorem, the loss of exergy occurs in the case of the return of heat, and when it is perceived by the cooler coolant. Taking into account the energy that is exchanged between "hot" and "cold" media streams in the heat exchanger at the contacts, EE were calculated. **Results.** It is established that in the "open" thermal networks the thermal efficiency coincides with the EE and equals one. For steam-water mixing machines, the EE varies within the range of 0.96-0.98 and depends on the vapor pressure and its saturation temperature. **Scientific novelty.** A thermodynamic model is proposed for estimating the exergent efficiency of directly constructs of heat exchangers with heat fluxes that are intermixed between them. **Practical meaningfulness.** If it is possible, it is desirable to switch to open heat networks for the housing and communal sector with water-water heat exchangers. With the impossibility of switching to open systems for individual heat points, the most exergent advantageous is the use of electric boilers.

Key words: exergy; mixing heat exchangers; hot water supply; thermal networks.

Вступ. В галузі теплопостачання виникла складна ситуація і в більшості теплових районів міст України відсутнє централізоване гаряче водопостачання. Напрямами виходу з такого стану і поліпшення роботи тепломереж є: а) відмова від мереж багато кілометрової протяжності; б) наближення джерел теплоти до споживача шляхом розукрупнення котельень; в) розбудова групових і будинкових котельень; г) використання відновлювальних альтернативних джерел теплової енергії [1].

Підготовка гарячої води в групових (ГТП) і індивідуальних (ІТП) теплових пунктах дещо обмежує використання швидкісних водо-водяних теплообмінників кожухотрубного та пластинчастого типу через їх значну вартість і певну складність конструкцій. Набагато простіші і дешевші є апарати контактного змішування теплових потоків водо-водяних і водо-парових. Водо-водяні апарати змішування використовуються в відкритих теплових мережах, в яких гаряче водопостачання забезпечується за рахунок тільки мережевої води. При використанні пари в технологічних процесах підприємств забезпечення гарячою водою їдальень, лазень, пральень, пунктів мийки транспорту використовуються пристрої (апарати) змішування пари з водопровідною водою [2,3].

Огляд і аналіз публікацій. При підготовці фахівців в галузі теплопостачання студенти вивчають дисципліну «Термодинаміка» і «Теплопостачання». Теоретичні питання і практичний матеріал, який вкладений в учбовій літературі по термодинаміці, мало пов'язаний з дисципліною теплопостачання [4,5]. В свою чергу при вивченні і проектуванні

різного типу теплообмінників основна увага приділена інженерним розрахункам теплообміну і відсутня їх ексергічна оцінка [2,6,7]. Відомі дослідження ексергетичної ефективності теплообмінних апаратів для: газової турбіни; систем кондиціонування повітря; швидкісних водо-водяних теплообмінників [8,9,10,11].

Досліджено ексергетичну ефективність систем гарячого водопостачання з використанням природного газу для парових котлів [9]. Встановлено, що з врахуванням втрати ексергії скидною водою для водяних теплообмінників їх коефіцієнт корисної дії змінюється в межах: термічного – (9,1-15,7)%; ексергетичного – (0,8-4,17)%. З використанням ексергії скидної води значення ККД зростають і змінюються в межах: термічного – (21,65-60,7)%; ексергетичного – (3,2-25,6)% без теплового насосу.

Дослідженнями Лабая В.Й. та Герасима Д.І. запропонована інноваційна модель систем кондиціонування повітря з комп'ютерною оцінкою ексергетичної ефективності від різниці температур і вибору її оптимального варіанту [10].

В роботі Задоянної О.В. надано методологію ексергоекономічного аналізу роботи системи кондиціонування повітря, представлені діаграми ексергетичних потоків та ексергетичної вартості [11].

Мета і задачі досліджень. Метою досліджень є оцінка роботоспроможності водо-водяних і пароводяних теплообмінників змішування в системах гарячого водопостачання з точки зору термодинаміки і оцінити їх ексергічну ефективність ЕККД при

відсутності скидної води і використанням конденсату пари.

Для досягнення мети досліджень виникають наступні задачі: 1) створити методіку розрахунку ексергетичного ККД (ЕККД) для водо-водяних і водо-парових апаратів змішування; 2) провести необхідні розрахунки ЕККД з використанням відомих літературних даних тепло-інженерних параметрів розрахунку; 3) провести аналіз результатів досліджень і сформулювати їх наукову і практичну корисність.

Основна частина. Методика розрахунку ексергетичного ККД (ЕККД) для теплообмінників змішування з повним використанням мережевого теплоносія (водяного чи парового) розроблена на основі літературних джерел [12,13]. В водо-водяних апаратах змішування, мережевий теплоносій після систем опалення з температурою T_x змішується з мережевою водою з температурою T_m , і кінцевим результатом є отримання гарячої води для споживача з температурою T_r ($T_x \leq T_r \leq T_m$).

Теоретичний ККД (ТККД) η_t можливо визначити як відношення циклів Карно сприйманням теплоти Q_x холодним T_x носієм до віддачі теплоти Q_m гарячим T_m теплоносієм. При цьому «холодна» вода нагрівається до температури T_r , а мережевий теплоносій охолоджується та такої ж температури T_r . Отже буде справджуватись відношення:

$$\eta_t = Q_x / Q_m. \quad (1)$$

де: Q_x , Q_m – потужність теплових потоків, що змішуються, кВт.

З використанням температур, що приймають участь в теплообміні при змішуванні, більш детально відношенням (1) матиме вираз:

$$\eta_t = G C T_r (1 - T_x T_r^{-1}) / (\alpha G T_m (1 - T_r T_m^{-1})). \quad (2)$$

де: α – частка масової витрати «гарячого» теплоносія з тепломережі; $1-\alpha$ – частка масової витрати «холодного» теплоносія після системи опалення; G – необхідна (проектна) потреба в гарячій воді (кг/с); C – теплоємність води, Дж/(кг К).

Для визначення часток α і $1-\alpha$ використано рівняння балансу ентальпій:

$$\alpha G C T_m + (1-\alpha) C T_x = G C T_r. \quad (3)$$

Його розв'язок відносно α , де є наступні залежності:

$$\alpha = (T_r - T_x) / (T_m - T_x). \quad (4)$$

Якщо значення α з залежності (4) підставити в відношення (2) і виконати необхідні перетворення, то отримано значення термічного ККД апарату водо-водяного змішування: $\eta_t = 1$. Але за своєю сутністю η_t не характеризує втрату ексергії, бо за другим законом термодинаміки ця втрата дорівнює анергії a , що визначається на основі залежності:

$$a = |a_r - a_x|. \quad (5)$$

де: a_r , a_x – анергія в потоках «гарячого» і «холодного» потоків теплоти.

Знак абсолютної величини (модуль) в залежності (5) означає, що в замкненій системі анергія одного з потоків може переходити в ексергію іншого потоку і її значення дещо зменшується. Значення a_r та a_x на основі теореми Гюї-Стодоли обчислюється за формулами:

$$a_r = \alpha G C T_x (1/T_r - 1/T_m). \quad (6)$$

$$a_x = (1-\alpha) G C T_m (1/T_x - 1/T_r). \quad (7)$$

Після підстановки значень a_r та a_x в залежність (5) отримано значення анергії:

$$a = Q_r (T_m - T_r) (T_r - T_x) / (T_r + T_x) / (T_m T_r T_x). \quad (8)$$

де: Q_r – ексергетична потужність апарату змішування, кВт.

Ексергетичний ККД при уже відомих значень ексергії e та анергії a розраховується на основі залежності:

$$\eta_e = e / (e + a). \quad (9)$$

В табл.1. наведені розрахунки ЕККД для водо-водяного змішувача, який запроєктований для відкритої системи теплопостачання [7].

Таблиця 1.

Вихідні дані та результати розрахунків η_e , Basic datas and results of calculations η_e

| № З / п | Зовнішня температура, t_3 | Потужність Змішувача $e=Q_r$, кВт | Температури теплових потоків, К/°С | | | Втрата Ексергії a , кВт | Ексергетичний ККД |
|------------------|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|
| | | | $\frac{T_z}{t_z}$ | $\frac{T_s}{t_s}$ | $\frac{T_m}{t_m}$ | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 8 | 55,5 | $\frac{306}{33}$ | $\frac{333}{60}$ | $\frac{337}{64}$ | 0,11 | 0,998 |
| 2 | -4 | 55,5 | $\frac{321}{48}$ | $\frac{333}{60}$ | $\frac{363}{90}$ | 0,33 | 0,997 |
| 3 | -15 | 55,5 | $\frac{333}{60}$ | $\frac{333}{60}$ | $\frac{393}{120}$ | 0,0 | 1,0 |

Аналіз результатів розрахунку показує, що термічний ККД η_t співпадає з ексергетичним ККД η_e , отже водо-водяні теплообмінники контактного змішування є найбільш ефективні.

Оцінка паро-водяних контактних змішувачів теплових потоків показує наступне. Рівняння балансу ентальпій для середовища пара+вода має вигляд при ентальпії пари r (кДж/кг) з температурою пароутворення T_n (К) при тиску p (МПа):

$$\alpha G r + (1-\alpha) G C T_x = G C T_G \quad (10)$$

де: G - масова потреба в гарячій воді (кг/с). Його розв'язок відносно частки α має вигляд залежності:

$$\alpha = C (T_G - T_x) / (r - C T_x). \quad (11)$$

Після конденсації пари конденсат з температурою T_n змішується з уже підігрітою до температури T_x' «холодною» водою:

$$T_x' = (C T_G - \alpha r_0) / ((1 - \alpha) C). \quad (12)$$

де: r_0 -питома ентальпія пароутворення (кДж/кг).

Кінцевим результатом буде значення енергії, яка розраховується як для водо-водяного змішування.

$$a = Q_G (T_n - T_G) (T_G - T_x) (T_r + T_x) / (T_n T_G T_x). \quad (13)$$

і коефіцієнт ЕККД η_e розраховується за формулою, аналогічній формулі (9).

В табл.2. наведені вихідні дані змішування пари з холодною водою та результати проміжних та кінцевих розрахунків.

Таблиця 2.

Результати розрахунків проміжних значень T_x' , а то ексергетичного ККД η_e / Results of calculations of the intermediate values T_x' , a exergetical CUM η_e

| № 3/п | Потужність Змішувача $Q_G = e$, кВт | Тиск p , МПа | Температура насичення T_n (К) | Ентальпія кДж/кг | | Температура, К | | | Анергія a , кВт | ЕККД, η_e |
|-------|--------------------------------------|----------------|---------------------------------|------------------|----------------------|----------------|-------|--------|-------------------|----------------|
| | | | | пари, r | пароутворення, r_0 | T_G | T_x | T_x' | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 200 | 0,1 | 372 | 2675 | 2260 | 333 | 278 | 296 | 5,0 | 0,977 |
| 2 | 200 | 0,2 | 393 | 2700 | 2200 | 333 | 278 | 298 | 6,8 | 0,967 |
| 3 | 200 | 0,4 | 416 | 2738 | 2136 | 333 | 278 | 303 | 7,6 | 0,964 |
| 4 | 200 | 0,6 | 431 | 2760 | 2090 | 333 | 278 | 305 | 8,0 | 0,961 |

Аналіз розрахунків ЕККД η_e , показує, що його значення з похибкою від 2,3% до 3,9% наближається до одиниці. При цьому зі зростанням тиску p контактного змішування потоків парового і водяного середовища його значення зменшується від $\eta_e=0,977$ до $\eta_e=0,961$. Це явище можливо пояснити: а) різницею теплоємністю C для «холодної» води та нагрітою до температури T_n конденсату; б) наявність парових бульбашок в яких тепловіддача до води приходить через поверхню утворених сфер. Але в цілому ЕККД для паро-водяних апаратів контактного змішування залишається високим, хоч і поступається водо-водяним апаратам змішування, для яких $\eta_e \in 0,977 \div 1,0$.

Електричні бойлери для підготовки гарячої води автором не досліджувались, бо згідно з законом збереження енергії і другим законом термодинаміки, електрична енергія стовідсотково переходить в теплову енергію середовищ.

Висновки.

1. Термічний ККД теплообмінних апаратів контактного змішування дорівнює одиниці через

рівність потужностей теплових потоків, що перемішуються.

2. Енергетичні ККД теплообмінників змішування теплових потоків для підготовки гарячого водопостачання за своїми значеннями наближаються до термічних ККД.

3. При потужних джерелах теплової енергії (від ТЕЦ, технологічної промислової котельні) для відкритих теплових мереж доцільно залишається централізоване гаряче водопостачання з використанням водо-водяних теплообмінників змішування.

4. Для промислових об'єктів з тепловими пунктами з паровим теплоносієм при підготовці гарячої води доцільно використовувати паро-водяні апарати змішування, а для індивідуальної підготовки гарячої води-електричні бойлери.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Концепція Державної цільової програми модернізації комунальної теплоенергетики (Розпорядження Кабінету міністрів України від 02.04.2009 р. № 440-р.– Київ.
2. Козин В. Е. Теплоснабжение: Учебное пособие для студентов вузов / В.Е. Козин, Т.А. Левина, А.П. Марков, И.Б. Пронина, В.А. Слемзин. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
3. Олександрюк А. А. Расчет и проектирование индивидуальных тепловых пунктов / А.А. Олександрюк. – Макеевка: ДГАСА, 1999. – 103 с.
4. Техническая термодинамика /Под. ред. В.И. Крутова. – М.:Машиностроение, 1991. – 384 с.
5. Буляндра О. Ф. Технічна термодинаміка: підручник / О.Ф. Буляндра. – 2-ге вид., випр. – К.: Техніка, 2006. – 320 с.
6. Єнін П.М. Теплопостачання (частина I «Теплові мережі і споруди») / П.М.Єнін, Н.А.Швачко. – К.: Кондор, 2007. – 241 с.
7. Тихомиров К.В. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция: учеб. / К.В. Тихомиров, Э.С. Сергеевко. — М.: Стройиздат, 1990. – 480 с.
8. Чепурний М.М. Основи технічної термодинаміки: підруч. для вузів / М.М. Чепурний, С.Й. Ткаченко. – Вінниця: Поділля - 2000, 2004. – 351 с.
9. Малкін Е. С., Журавська Н. Є. Розрахунки енергетичної та ексергетичної ефективності систем гарячого водопостачання об'єктів житловокомунального сектора / Е. С. Малкін , Н. Є. Журавська // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2016. – Вип. 20. – с. 3-13.
10. Лабай В.Й., Герасим Д.І. Дослідження ексергетичної ефективності систем кондиціонування повітря чистих приміщень// Холодильна техніка та технологія - №4(150), 2014.- С 47-55.
11. . Задоянний О. В. Ексергетичні критерії при оцінці енергоощадності систем кондиціонування повітря будівель і споруд / О. В. Задоянний // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури. – 2014. – Вип. 17. – с. 3-9.
12. Соколов Е.Я. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения: учеб. пособие для вузов. - 2-е изд., перераб. / Е.Я. Соколов, В.М. Бродянский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 320 с.
13. Эксергетические расчеты технических систем: справ. пособие / [В.М. Бродянский, Г.П. Верхивкер, Я.Я. Карчев и др.]; под ред. А.А. Долинского, В.М. Бродянского; Ин-т технической теплофизики АН УССР. – Киев: Наук. думка, 1991. – 360 с.

REFERENCES

1. The Concept of the State Target Program for the Modernization of the Communal Heat Power Engineering (Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated April 2, 2009 No. 440-p.-Kyiv.
2. Kozin V .E. Heat supply: A manual for university students / V.E. Kozin, T.A. Levina, AP Markov, I.B. Pronina, VA Smeszin - M .: Higher school, 1980. - 408 p.
3. Oleksandryuk A. A. Calculation and design of individual thermal points / AA Aleksandryuk - Makeevka: ДГАСА, 1999. - 103 с.
4. Technical thermodynamics / Pod. Ed. YOU. Krutov - M.: Mechanical Engineering, 1991. - 384 pp.
5. Bulandra O. F. Technical thermodynamics: textbook / O.F. Bulandra - 2nd view., vipr. - K .: Technics, 2006. - 320 p.
6. Yenin P.M. Heat supply (part I "Thermal networks and structures") / P. M. Yeinin, N. A. Shvachko. - K.: Condor, 2007. - 241 p.
7. Tikhomirov K.V. Heat engineering, heat and gas supply and ventilation: study. / K.V. Tikhomirov, E.S. Sergeenko - Moscow: Sroyizdat, 1990. - 480 pp.
8. Chepurny M. M. Fundamentals of technical thermodynamics: subcategory. for high schools / M.M. Chepurny, S.Y. Tkachenko - Vinnitsa: Podillya - 2000, 2004. - 351 p.
9. Malkin E.S., Zhuravskaya N. E. Calculations of energy and exergent efficiency of hot water supply systems of housing communal sector / E. S. Malkin, N. E. Zhuravskaya // Ventilation, lighting and heat and gas supply: . save / Kiev National University of Construction and Architecture. - 2016. - Voice over 20. - p. 3-13.
10. Labay V.Ya., Gerasim D.I. Investigation of exergic efficiency of air conditioning systems of clean rooms // Refrigerating technology and technology - №4 (150), 2014.- С 47-55.
11. Zadoyanny O. V. Exergy criteria for the estimation of energy efficiency of air conditioning systems of buildings and structures / O. V. Zadoyanny // Ventilation, lighting and heat and gas supply: save / Kiev National University of Construction and Architecture. - 2014. - Vip. 17. - p. 3-9.
12. Sokolov E.Ya. Energy basics of heat transformation and cooling processes: study. a manual for high schools. - 2nd ed., pererab. / E. Ya. Sokolov, VM Brodyansky - Moscow: Energoizdat, 1981. - 320 p.
13. Exergy calculations of technical systems: cases. allowance / [V.M. Brodyansky, GP Verhivker, Ya.Ya. Karchev et al.]; ed. AA Dolinsky, VM Brodyansky; Institute of Technical Thermophysics, Academy of Sciences of the USSR. - Kiev: Science. opinion, 1991. - 360 p.

Надійшла до редколегії 7.10.2018 р.