

УДК 536.7

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF RECUPERATIVE SYSTEMS

A. Chagayda, K. Vasylykivsky*National University of Food Technologies***Key words:**

thermodynamics,
recovery,
regeneration,
exergy,
energy,
evaporation,
condensation,
compression,
balance

Article history:

Received 18.04.2019

Received in revised form

06.05.2019

Accepted 18.05.2019

Corresponding author:

mif63@i.ua

ABSTRACT

Structural construction of any technological system is carried out taking into account the flow of material and energy flows with the emphasis on the need to use secondary energy resources. The article gives an analysis of the possibilities of increasing the thermal efficiency coefficients in regenerative cycles, and evaluates the prospects for using energy, entropy and energy balances.

The purpose of the study is the energy analysis of ejection thermocompressors to evaluate the prospects for their application in food technologies. It is shown that a technological apparatus in a recuperative system can simultaneously perform the role of an evaporator and a condenser in a system that, in the presence of an ejector, as a thermodynamic compensator, is transformed into an analogue of a heat pump. It is determined that the main losses of the energy in the even-phase ejector transformers are related to the shock interaction for mixing two co-flows with different initial velocities. Impact losses are proportional to the square of the difference in flow rates. In such recuperative systems, the secondary energy resources of the food industry are often represented by the heat energy of liquid media or by a secondary vapor. The use of energy potentials of liquid or near to them according to the flow structure is achieved by heat exchange with counter flows. The result of this interaction is the energy recovery.

With the use of secondary energy resources of the steam or gas phases, the regenerative heat exchange on physical abilities may be complemented by regeneration and the advent of thermodynamic parameters to values that allow to be removed from systems or to restrict the power of primary sources. Regeneration of the secondary vapor allows, during its subsequent condensation, to return the heat potential of the steam to the environment in the environment. This means that in the systems where the increase in the thermodynamic parameters of the pair due to its compression, there is the use of Carnot's return cycle.

DOI: 10.24263/2225-2916-2019-25-22

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ РЕКУПЕРАТИВНИХ СИСТЕМ

А. О. Чагайда, канд. техн. наук

К. В. Васильківський, канд. техн. наук

Національний університет харчових технологій

Мета дослідження — ексергетичний аналіз ежекційних термокомпресорів для оцінки перспектив їх застосування в харчових технологіях. Показано, що технологічний апарат в рекуперативній системі може одночасно виконувати роль випарника і конденсатора в системі, яка за наявності ежектора як термодинамічного компенсатора перетворюється в аналог теплового насоса. Визначено, що основні втрати ексергії в рівнофазних ежекторних трансформаторах пов'язані з ударною взаємодією за змішування двох співвісних потоків з різними початковими швидкостями. Регенерація вторинної пари в процесах її наступної конденсації дає змогу повертати в середовища потенціал теплоти пароутворення. Це означає, що в системах, у яких реалізується підвищення термодинамічних параметрів пари за рахунок її стискування, має місце використання зворотного циклу Карно.

Ключові слова: термодинаміка, рекуперація, регенерація, ексергія, енергія, випаровування, конденсація, компресія, баланс.

Постановка проблеми. Інтенсивність і якість перебігу окремих енерго- і масообмінних процесів визначаються загальними вимогами технологій. Узагальненою оцінкою більшості систем виступає їх коефіцієнт корисної дії, однак відомо [1; 2], що більш високий термічний ККД, ніж у зворотного циклу Карно у заданому інтервалі температур отримати неможливо. Проте можливо здійснити інші зворотні цикли за існування двох джерел теплоти сталої температури, які відрізняються своєю конфігурацією від циклу Карно, але за деяких умов за показником термічного ККД відповідають останньому. На рис. 1 наведено цикл 1-2-3-4, що складається з двох ізотерм 1-2 і 3-4 і двох довільних зворотних процесів 2-3 та 4-1, еквідистантних у горизонтальному напрямку. В ізотермічному процесі 1-2 від тепловіддавача з температурою T_1 робочому тілу передається кількість теплоти $q_1 = T_1(s_2 - s_1)$. У процесі 2-3 робоче тіло змінює свій стан, віддаючи q_{2-3} , еквівалентне площі 7-3-2-8. Для здійснення зворотного переходу від точки 2 з температурою T_1 до точки 3 з температурою T_2 необхідно мати певні умови теплопередачі. На ділянці від точки 3 до точки 4 робоче тіло ізотермічно стискається і сприймає питому теплоту $q_2 = T_2(s_3 - s_2)$. На ділянці по лінії 4-1 робоче тіло поглинає кількість теплоти q_{4-1} , що відповідає площі 5-4-1-6 із забезпеченням тих же умов теплопередачі. Різниця питомої теплоти $q_1 - q_2$ забезпечує позитивну роботу циклу:

$$P = q_1 - q_{2-3} - q_2 + q_{4-1} = q_1 - q_2 \quad (1)$$

і відповідно до цього термічний ККД циклу:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{T_1(s_2 - s_1) - T_2(s_3 - s_4)}{T_1(s_2 - s_1)}. \quad (2)$$

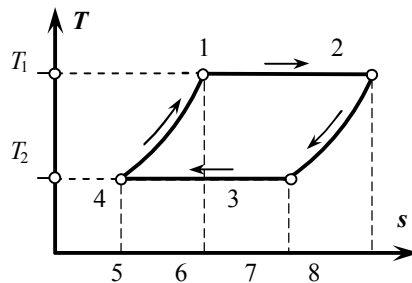


Рис. 1. Діаграма регенеративного циклу

За еквідістантних кривих 2-3 та 4-1 маємо:

$$s_1 - s_4 = s_2 - s_3 \quad \text{і} \quad s_2 - s_1 = s_3 - s_4 \quad (3)$$

і тому ККД циклу:

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (4)$$

Звідси термічний коефіцієнт розглянутого циклу дорівнює термічному ККД зворотного циклу Карно. У зв'язку з цим цикли за участю регенераторів теплоти мають назву регенеративних, а за участі в них двох ізотерм і довільних еквідістантних кривих вони вважаються узагальненими.

Звертання до адіабатної системи за необернених процесів в ній, як відомо, характеризується зростанням ентропії:

$$ds > \delta Q/T. \quad (5)$$

Оскільки в ній $\delta Q = 0$, то $ds > 0$. Таким чином в ізольованій системі виконується умова $ds \geq 0$ і оберненим процесам відповідає знак «дорівнює».

У випадку введення в систему проміжного теплоносія між тепловіддавачем і теплоприймачем зменшення роботоздатності робочого тіла внаслідок введення додаткового незворотного процесу визначається залежністю Гюї-Стодоли:

$$L_0 = T_2 (Q_1/T_1' - Q_1/T) = T_2 \Delta s_{\text{сум}}. \quad (6)$$

У термодинаміці значна увага приділяється можливості отримання максимальної роботи від робочого тіла за зміни його стану від початкового до стану середовища за здійснення обернених адіабатних та ізотермічних процесів. Така робота має назву роботоздатності (повної ексергії). Сукупність матеріального і теплового балансів дають можливість визначити втрати маси і теплоти, а ексергетичний баланс — термодинамічний рівень якості будь-якого процесу, циклу, системи і здійснити можливість їх удосконалення [4; 5].

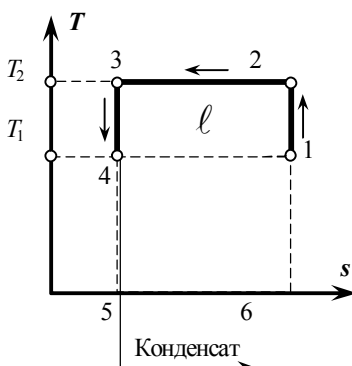


Рис. 2. Діаграма циклу з використанням вторинної пари

Перспективи такого удосконалення стосуються значної кількості термодинамічних процесів, пов'язаних з технологіями обробки сировинних потоків і виробництва продуктів харчування. Перетворення матеріальних потоків в них відбуваються під впливом температури й тиску і можуть відбуватися без пароутворення або з обмеженим генеруванням парової фракції, або навіть з активним пароутворенням [6; 7]. Наявність останнього означає температурну стабілізацію оброблюваного середовища і значні енергетичні витрати фазового переходу. Важливо, що генерована пара стає носієм такого енергетичного потенціалу, використання якого можливе в режимі конденсації. Останнє означає необхідність звернутися до процесу, в якому є потреба у використанні теплового потоку конденсації. Перш за все доцільно звернутися до енергозабезпечення первинного процесу і його завдання. Якщо для цього необхідно випаровування частини розчинника — води — для концентрування розчинених речовин, то наближене до адіабатного стискання вторинної пари приводить до підвищення її температури конденсації і це надає можливість передати потенціал конденсації середовищу з наближенням до повного обмеження витрат первинного енергоджерела. Такий процес має здійснюватися через герметичну поверхню теплопередачі. При цьому технологічний апарат виконує подвійну роль: випарника і конденсатора [8]. Необхідність здійснення випарювання означає подальше вилучення із схеми конденсату вторинної пари. Це, у свою чергу, означає, що з точки зору матеріального балансу цикл є незамкнутим, але з енергетичної оцінки він є замкнутим з добавкою в контурі енергії ℓ стискання пари (рис. 2). Енергія вторинної пари представлена площею 1-4-5-6-1, енергія стискання — площею 1-2-3-4-1, а енергія конденсації — площею 1-2-3-4-5-6-1. В циклі наявні адіабати 1-2 і 3-4, ізотерма 2-3 та умовна ізотерма 4-1. Механічна компресія вторинної пари може бути замінена на термокомпресію в ежекторі за рахунок первинної пари за збереження наведених термодинамічних властивостей.

Метою дослідження обрано ексергетичний аналіз ежекційних термокомпресорів для оцінки перспектив їх застосування в технологіях харчових виробництв.

Матеріали і методи дослідження представлені у формі аналітичних і феноменологічних узагальнень на основі законів класичної термодинаміки і механіки.

Результати дослідження. Частина матеріалів, викладених у вступі, дає змогу навести схему системи з рекуперативним використанням вторинної пари (рис. 3). Схему ежекційного термокомпресора наведено на рис. 4.

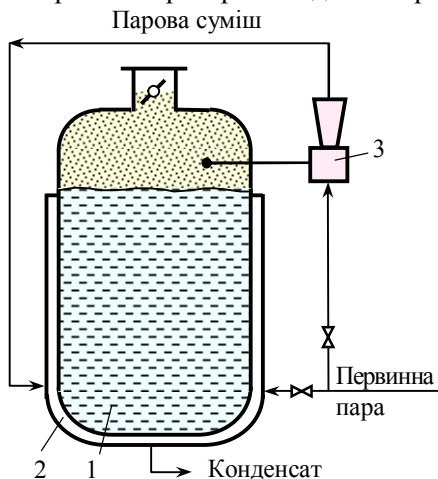


Рис. 3. Схема системи з рекуперативним використанням вторинної пари:
1 — випарний апарат; 2 — сорочка випарного апарата; 3 — ежектор

Потік первинної пари, як середовища з більш високим тиском, називається робочим. Він виходить із сопла в приймальну камеру з підвищеною швидкістю і зтягує сюди вторинну пару, яка має менший тиск. Кінетична енергія робочого потоку частково передається потоку вторинної пари. Подальше переміщення суміші супроводжується змішуванням потоків і перетворенням кінетичної енергії змішаного потоку в потенціальну енергію тиску з підвищенням температури. За швидкоплинного перебігу цей процес можна вважати наближеним до адіабатного.

Підвищення тиску вторинної пари відбувається без участі механічної енергії і робочих органів, що є принциповою якістю термокомпресорів. Стиснута суміш первинної і вторинної пари спрямовується в сорочку нагрівання з можливістю обмеження первинного енергоносія.

Опис фізичних процесів, наведений раніше, підлягає математичному моделюванню на основі трьох законів:

а) збереження енергії

$$i_{пер.} + ui_{вт.} = (1 + u)i_{сум.}, \quad (7)$$

де $u = m'_{вт.}/m'_{пер.}$ — коефіцієнт ежекції; $m'_{вт.}$ і $m'_{пер.}$ — масові потоки вторинної і первинної пари відповідно, кг/с;

б) збереження маси

$$m'_{сум.} = m'_{пер.} + m'_{вт.}, \quad (8)$$

де $m'_{сум.}$ — масовий потік суміші парових фаз на виході з ежектора, кг/с;

в) збереження імпульсів

$$m'_{nep.1} w_{nep.1} + m'_{вт.1} w_{вт.1} - (m'_{nep.1} + m'_{вт.1}) w_{сум.3} =$$

$$p_{сум.3} f_{сум.3} + \int_{f_3}^{f_1} p df - (p_{nep.1} f_{nep.1} + p_{вт.1} f_{вт.1}), \quad (9)$$

де $w_{nep.1}$, $w_{вт.1}$ та $w_{сум.3}$ — швидкості первинного і вторинного потоків пари у вхідному перерізі камери змішування та потоку суміші у вихідному перерізі цієї камери, м/с; $p_{nep.1}$, $p_{вт.1}$ та $p_{сум.3}$ — статичні тиски первинного і вторинного потоків пари у вхідному перерізі камери змішування і потоку суміші на виході з неї, Па; $f_{nep.1}$, $f_{вт.1}$ та $f_{сум.3}$ — площі перерізів первинного і вторинного потоків на вході в камеру змішування і потоку суміші на виході з камери, м²; $\int_{f_3}^{f_1} p df$ — інтеграл імпульсу сил на бічну поверхню камери змішування між перерізами 1-1 та 2-2.

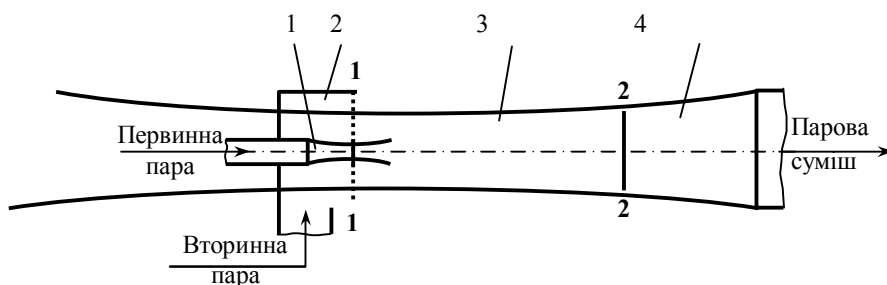


Рис. 4. Схема ежекційного термокомпресора:

1 — робоче сопло; 2 — приймальна камера; 3 — камера змішування; 4 — дифузор

Наведені термодинамічні співвідношення стосуються можливостей інтенсивного енергозаощадження, однак подальше удосконалення технологій енергетичних трансформацій потребує більш широкого використання теплотехнічних, технологічних та інших варіацій.

Оцінка придатності до використання вторинних енергетичних ресурсів потребує використання другого закону термодинаміки, відповідно до якого всі види теплових потоків характеризуються показником якості, тобто здатністю до виконання роботи.

Показник якості різних видів теплоти (ексергія) являє собою максимальну здатність матерії до здійснення роботи в такому процесі, кінцевий стан якого визначається рівновагою з навколишнім середовищем.

Ексергетичний метод використовується з метою оптимізації з енергетичної точки зору технологічних процесів і визначення шляхів їх подальшої термодинамічної досконалості. Реальні енергетичні процеси є незворотними і ця незворотність є причиною їх недосконалості. Енергетичний баланс за своєю фізичною природою, однак не відображує втрати системи від незворотності.

Основні втрати ексергії в рівнофазних ежекторних трансформаторах пов'язані з ударною взаємодією за змішування двох співвісних потоків з різними початковими швидкостями.

Визначимо величини цих енергетичних втрат та їх наслідки у випадку ізобарного процесу, коли тиск по довжині камери змішування залишається сталим. За ізобарного процесу маємо умову, за якою кількість руху суміші на виході з камери змішування дорівнює сумі кількостей руху потоків первинної і вторинної пари:

$$(m'_{пер.} + m'_{вт.})w_{сум.3} = m'_{пер.}w_{пер.1} + m'_{вт.}w_{вт.1}, \text{ Н}, \quad (10)$$

Звідки

$$w_{сум.3} = \frac{m'_{пер.}w_{пер.1} + m'_{вт.}w_{вт.1}}{m'_{пер.} + m'_{вт.}}, \text{ м/с}, \quad (11)$$

За відомих значень швидкостей потоків визначимо їх потужності:

$$E_{пер.1} = \frac{m'_{пер.}}{2} w_{пер.1}^2, \text{ Вт}, \quad (12)$$

$$E_{вт.1} = \frac{m'_{вт.}}{2} w_{вт.1}^2, \text{ Вт}. \quad (13)$$

Потужність кінетичної енергії потоків після змішування:

$$E_{сум.3} = \frac{m'_{пер.} + m'_{вт.}}{2} w_{сум.3}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{(m'_{пер.}w_{пер.1} + m'_{вт.}w_{вт.1})^2}{m'_{пер.} + m'_{вт.}}, \text{ Вт}. \quad (14)$$

Втрати на удар внаслідок змішування потоків:

$$\Delta E = E_{пер.1} + E_{вт.1} - E_{сум.3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m'_{пер.}m'_{вт.}}{m'_{пер.} + m'_{вт.}} (w_{пер.1} - w_{вт.1})^2, \text{ Вт}. \quad (15)$$

Питома втрата на удар, віднесена до потоку первинної пари

$$\delta E_{пер.} = \frac{\Delta E}{m'_{пер.}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{u}{1+u} (w_{пер.1} - w_{вт.1})^2, \text{ Дж/кг}, \quad (16)$$

або стосовно потоку вторинної пари

$$\delta E_{вт.} = \frac{\Delta E}{m'_{вт.}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(w_{пер.1} - w_{вт.1})^2}{1+u}, \text{ Дж/кг}. \quad (17)$$

Як видно з формули (15), втрати на удар пропорційні квадрату різниці швидкостей потоків. Збільшення швидкості потоку вторинної пари на вході в камеру змішування втрати на удар зменшує.

Досконалість струминних апаратів-трансформаторів визначається величиною коефіцієнта корисної дії, який є відношенням ексергії, отриманої вторинним потоком пари до ексергії, витраченої потоком первинної пари:

$$\eta = \frac{u(e_{\text{сум.}} - e_{\text{вт.}})}{e_{\text{пер.}} - e_{\text{сум.}}}, \quad (18)$$

де $e_{\text{пер.}}$, $e_{\text{вт.}}$ та $e_{\text{сум.}}$ — питомі ексергії первинного, вторинного потоків і суміші цих потоків.

При цьому питомою ексергією вважається робота, яку можливо отримати за допомогою однієї масової одиниці робочого тіла, наприклад, 1 кг газу або пари, за оберненої її взаємодії з навколишнім середовищем.

Питома ексергія визначається за формулою:

$$e = i_0 - i_{\text{н.с.}} - T_{\text{н.с.}}(s_0 - s_{\text{н.с.}}), \text{ кДж/кг}, \quad (19)$$

де i_0 , s_0 — питома ентальпія і питома ентропія первинної пари в ізоентропно загальмованому стані; $i_{\text{н.с.}}$, $s_{\text{н.с.}}$ — питома ентальпія і питома ентропія первинної пари в стані рівноваги з навколишнім середовищем; $T_{\text{н.с.}}$ — температура навколишнього середовища; надалі приймемо $T_{\text{н.с.}} = 293 \text{ K}$.

З урахуванням умов (18) та (19) маємо:

$$\eta = \frac{u[i_{\text{сум.}} - i_{\text{вт.}} - T_{\text{н.с.}}(s'_{\text{сум.}} - s_{\text{вт.}})]}{i_{\text{пер.}} - i_{\text{сум.}} - T_{\text{н.с.}}(s'_{\text{пер.}} - s_{\text{сум.}})}, \quad (20)$$

де $i_{\text{пер.}}$, $i_{\text{вт.}}$ та $i_{\text{сум.}}$ — питомі ентальпії первинного, вторинного і стиснутого потоків у загальному стані; $s_{\text{пер.}}$, $s_{\text{вт.}}$ та $s_{\text{сум.}}$ — питомі ентропії цих потоків у загальному стані.

Висновки.

1. Основним джерелом в енергетичному забезпеченні харчових підприємств продовжує залишатися хімічна енергія сполук навколишнього середовища. У зв'язку з особливостями трансформацій різних енергій стосовно теплової найбільша термодинамічна ефективність стосується перетворень хімічної енергії у теплову і максимально можливого використання останньої.

2. Вторинні енергетичні ресурси харчових виробництв частіше представлені тепловою енергією рідинних середовищ або вторинною парою. Використання енергетичних потенціалів рідинних або наближених до них за структурою потоків частіше досягається теплообміном із зустрічними потоками. Результатом такої взаємодії є енергетична рекуперація.

За використання вторинних енергетичних ресурсів парових або газових фаз рекуперативний теплообмін за фізичними можливостями може доповнюватися регенерацією і доведенням термодинамічних параметрів до значень, які дають змогу вилучати із систем або обмежувати дію енергетичних першоджерел. Регенерація вторинної пари в процесах її наступної конденсації повертає в середови-

ща потенціал теплоти пароутворення. Це означає, що в системах, у яких реалізується підвищення термодинамічних параметрів пари за рахунок її стиснення, має місце використання зворотного циклу Карно. Таке використання відбувається як у замкнутих, так і у відкритих циклах.

3. Робота стиснення вторинної пари у десятки і сотні разів менша за теплоту її конденсації. Саме це визначає високий рівень ефективності рекуперативних режимів. Однак пряме і безпосереднє використання вторинної пари в режимах конденсації виключає доцільність наявності теплових насосів у таких системах.

4. В основу розрахунків систем рекуперації вторинної пари покладаються матеріальні і теплові баланси. Опис фізичних процесів, що супроводжують роботу термокомпресорів, підлягає математичному моделюванню на основі законів збереження енергії, збереження маси і збереження імпульсів. Оцінка придатності до використання вторинних енергетичних ресурсів здійснюється на основі ексергетичних методів з метою визначення напрямків подальшого їх вдосконалення.

5. Основні втрати ексергії в рівнофазних ежекторних трансформаторах пов'язані з ударною взаємодією співвісних потоків з різними початковими швидкостями. За ізобарних процесів енергетичні втрати на удар пропорційні квадрату різниці швидкостей потоків. Досконалість струминних апаратів-трансформаторів визначається ККД у формі відношення ексергії, отриманої вторинним потоком пари до ексергії, витраченої потоком первинної пари.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Нащокин В. В.* Техническая термодинамика и теплопередача / Нащокин В. В. — Москва: Высшая школа, 1980. — 367 с.
2. *Клемеш Й.* Синтез оптимальной структуры систем теплообмена / Й. Клемеш, Р. Панчик // Теоретические основы химической технологии. — 1987. — Т. 1, № 4. — С. 488—499.
3. *Sama D. A.* The use of the Second Law of Thermodynamics in Process Design / D. A. Sama // Journal of Energy Resources Technology. — 1995. — Vol. 117. — P. 179—184.
4. *Соколенко А. І.* Енергоматеріальні трансформації в харчових технологіях на основі замкнутих контурів / Соколенко А. І., Піддубний В. А., Чагайда А. О. — Київ: Кондор-Видавництво, 2015. — 300 с.
5. Теплові насоси в системах теплохолодопостачання / Снежкін Ю. Ф. та ін. — Київ: Наукова думка, 2008. — 104 с.
6. *Соколенко А. І.* Про енергозбереження і енергоресурси / Соколенко А. І., Піддубний В. А. // Харчова промисловість. — 2007. — № 5. — С. 66—68.
7. Енергетичні трансформації і енергозбереження в харчових технологіях / Соколенко А. І. та ін. — Київ: Фенікс, 2012. — 484 с.
8. Інтенсифікація тепломасообмінних процесів в харчових технологіях / А. І. Соколенко та ін. — Київ: Фенікс, 2011. — 536 с.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕКУПЕРАТИВНЫХ СИСТЕМ

А. О. Чагайда, К. В. Васильковский

Национальный университет пищевых технологий

Цель исследования — эксергетический анализ эжекторных термокомпрессоров для оценки перспектив их применения в пищевых технологиях. Показано, что

технологический аппарат в рекуперативной системе может одновременно выполнять роль испарителя и конденсатора в системе, которая в присутствии эжектора в качестве термодинамического компенсатора превращается в аналог теплового насоса. Определено, что основные потери эксергии в равнофазных эжекторных трансформаторах связаны с ударным взаимодействием при смешивании двух соосных потоков с различными начальными скоростями. Регенерация вторичного пара позволяет в процессах его последующей конденсации возвращать в среды потенциал теплоты парообразования. Это означает, что в системах, в которых реализуется повышение термодинамических параметров пара за счет его сжатия, имеет место использование обратного цикла Карно.

Ключевые слова: *термодинамика, рекуперация, регенерация, эксергия, энергия, испарение, конденсация, компрессия, баланс.*