

**ПОТЕРИ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ В
ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С ПЛАСТИНЧАТЫМИ
ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРАМИ**

*Н. М. Фиалко чл.- корр. НАНУ, зав. отделом теплофизики
энергоэффективных технологий*

А. И. Степанова, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник

Р. А. Навродская, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник

Институт технической теплофизики НАН Украины

e-mail: nmfialko@ukr.net

Аннотация. Проблема разработки эффективных технологий утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок является важной составляющей общей проблемы модернизации энергетики Украины. Разработка высококачественного теплоутилизационного оборудования для энергетических установок различного типа неразрывно связана с разработкой и использованием эффективных методик оптимизации теплоутилизационных систем. Эти методики достаточно разнообразны и основаны на комплексных подходах, включающих различные методы исследования теплоутилизационных систем, в частности, такие, как эксергетические методы, методы термодинамики необратимых процессов и др. Сказанное определяет актуальность работы.

Цель работы – повышение эффективности работы пластинчатых теплоутилизаторов путем снижения потерь эксергетической мощности.

В работе анализируются потери эксергетической мощности в процессах теплопроводности при передаче теплоты через поперечное сечение неограниченной пластины, которой моделировалась пластина газовоздушного пластинчатого теплоутилизатора. Излагаются результаты расчетов потерь эксергетической мощности в процессах теплопроводности в неограниченной пластине при граничных условиях третьего рода.

Математическая модель исследуемых процессов включает уравнение эксергии, уравнения баланса эксергии и энтропии, уравнение неразрывности трехфазной термодинамической системы при изменении концентрации одной из фаз, уравнения движения фаз, уравнение энергий, уравнения баланса энтальпий, уравнения Гиббса и уравнение теплопроводности при граничных условиях третьего рода.

При получении формул для расчета потерь эксергетической мощности использовано локальное дифференциальное уравнение баланса эксергии трехфазной системы с переменной концентрацией одной из фаз, вывод которого представлен в работе [4]. В этом уравнении одно из слагаемых

определяет потери эксергетической мощности, обусловленные необратимостью процессов и связанные с теплопроводностью, вязкостью фаз, межфазным теплообменом и трением между фазами. На основании этого уравнения и решения уравнения теплопроводности при граничных условиях третьего рода для неограниченной пластины получены формулы для расчета потерь эксергетической мощности и рассчитаны потери в газовоздушном пластинчатом теплоутилизаторе.

Ключевые слова: теплоутилизационная система, процессы теплопроводности, потери эксергетической мощности

a – температуропроводность;	θ – температура теплоносителей;
c – удельная теплоемкость;	λ – теплопроводность;
h – удельная энтальпия;	v – скорость;
I_i – внешние потоки;	ρ – плотность;
e – удельная эксергия;	σ – источники эксергии, энтропии;
E – эксергетическая мощность;	τ_{ij} – тензор вязких напряжений;
P_{ij} – тензор напряжений;	φ – удельная потенциальная энергия;
p – давление;	w – концентрация.
q_{ij} – межфазная теплота;	Индексы верхние:
R_{ij} – сила межфазного взаимодействия;	(e) – эксергия;
s – удельная энтропия;	(s) – энтропия;
T – температура;	(q) – теплота;
t – время;	цм – центр масс.
u – удельная внутренняя энергия;	Индексы нижние:
V – объем;	0 – окружающая среда.
δ – толщина пластины;	

Актуальность. Ситуация, которая сложилась в энергетической сфере Украины, определяет актуальность работ, посвященных реализации различных направлений энергосбережения, в том числе направлению, связанному с повышением эффективности технологий утилизации теплоты.

Эксплуатация производств, связанных с котельными агрегатами, стекловаренными печами, вытяжной вентиляцией, дымоудалением, отсосами на технологических линиях и т.п., включает в себя мероприятия по утилизации теплоты от выбрасываемых газоздушных смесей. При решении этих проблем эффективным является применение теплообменников с перекрестным током – пластинчатых теплоутилизаторов, которые представляют собой пакет пластин, создающих систему каналов для прохождения двух несмешиваемых потоков

теплоносителей. Конструкционные параметры пластинчатого теплоутилизатора должны обеспечивать долговечность конструкции, возможность производить очистку внутреннего пространства теплоутилизатора и достаточно высокий КПД.

Одной из причин эксергетических потерь в различных элементах теплоутилизационных систем, является теплообмен при конечной разности температур. Для определения указанных потерь обычно используются уравнения эксергетического баланса. При таком подходе не всегда удастся выявить условия, при которых эксергетические потери будут минимальными, и разделить их по причинам и областям локализации. Для решения подобных задач может быть использован комплексный подход, сочетающий эксергетические методы с методами термодинамики необратимых процессов [1-3]. В настоящей работе на основе указанного подхода анализируются потери эксергетической мощности в процессах теплопроводности при передаче теплоты через поперечное сечение неограниченной пластины, которой моделировалась пластина газовоздушного пластинчатого теплоутилизатора.

Цель работы – повышение эффективности работы пластинчатых теплоутилизаторов путем снижения потерь эксергетической мощности.

Материалы и методы исследования. В данной работе рассмотрены основные этапы разработки методики расчета потерь эксергетической мощности в процессах теплопроводности в неограниченной пластине на основе использования комплексного подхода, сочетающего эксергетические методы с методами термодинамики необратимых процессов.

Результаты работы. Математическая модель исследуемых процессов включает уравнение эксергии, уравнения баланса эксергии и энтропии, уравнение неразрывности трехфазной термодинамической системы при изменении концентрации одной из фаз, уравнения движения фаз, уравнение

энергий, уравнения баланса энтальпий, уравнения Гиббса и уравнение теплопроводности при граничных условиях третьего рода:

$$e = h - h_0 - T_0 (s - s_0) + v^2/2 + \varphi, \quad (1)$$

$$\rho \frac{de}{dt} = - \frac{\partial}{\partial x_i} I_i^{(e)} + \sigma^{(e)}, \quad (2)$$

$$\rho \frac{ds}{dt} = - \frac{\partial}{\partial x_i} I_i^{(s)} + \sigma^{(s)}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho v_i = \frac{\rho}{1 - w_i} \frac{dw_i}{dt}, \quad (4)$$

$$w_i \rho \frac{dv_i}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} P_{ij}^{(i)} + w_i \rho g_i + R_i^{(ik)} - R_i^{(ij)}, \quad (5)$$

$$w_i \rho \frac{d_i}{dt} \left[u_i + \frac{1}{2} (v^{(k)})^2 + \varphi_i \right] = - \frac{\partial}{\partial x_i} (P_{ij}^{(k)} v_j^{(k)} + I_i^{(q_k)}) + q_{kj} - q_{ik}, \quad (6)$$

$$w_i \rho \frac{d_j h_j}{dt} = - \frac{\partial}{\partial x_i} (P_{ij}^{(j)} v_j^{(j)} + I_i^{(q_k)}) - q_{ij} + q_{jk} + w_j \rho g_i v_i^{(j)} - w_j \rho \frac{d_j}{dt} \frac{1}{2} (v^{(j)})^2 + w_j \rho \frac{d_j}{dt} (p^{(j)} \rho^{-1}), \quad (7)$$

$$w_i \rho T_i \frac{d_i s_i}{dt} = w_i \rho \frac{d_i u_i}{dt} + p^{(i)} \frac{\partial v_i^{(j)}}{\partial x_j}, \quad (8)$$

где оператор $\frac{d_i}{dt}$ имеет вид:

$$\frac{d_i}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_i^{(j)} \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad (9)$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T), \quad (10)$$

$$T|_{t=0} = T_0,$$

$$\begin{aligned} -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x_i} \right|_{x=0} &= \alpha \theta_1 - T_{x=0}, \theta_1 = \text{const}, \\ -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x_i} \right|_{x=h} &= \alpha \theta_2 - T_{x=h}, \theta_2 = T_0. \end{aligned} \quad (11)$$

С использованием уравнений (1 – 9), в работе [4] получено локальное дифференциальное уравнения баланса эксергии трехфазной системы с переменной концентрацией одной из фаз, которое может быть использовано для расчета эксергетических потерь и решения оптимизационных задач в теплоутилизационных системах, использующих в качестве теплоносителей многофазные среды. Уравнение имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \rho \frac{de}{dt} = & -\frac{\partial}{\partial x_i} \sum_{k=1}^3 \tau_e^{(k)} I_i^{(q_k)} + P_{ij}^{(k)} v_j^{(k)} + e_k I_i^{(k)} + w_k p v_i^k - v_i^{\text{нм}} - \\ & -T_0 \left[\sum_{k=1}^3 \left(-\frac{I_i^{(q_k)}}{T_k^2} \frac{\partial T_k}{\partial x_i} - \frac{\tau_{ij}^{(k)}}{T_k} \frac{\partial v_i^{(k)}}{\partial x_i} \right) + \sum_{\substack{l=1 \\ l < k}}^2 \sum_{\substack{k=1 \\ l \neq k}}^3 (R_i^{(lk)}) \left(\frac{v_i^{(l)}}{T_l} - \frac{v_i^{(k)}}{T_k} \right) + q_{lk} \left(\frac{1}{T_l} - \frac{1}{T_k} \right) \right] + \\ & + \rho \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^3 w_k p \frac{p^{(k)}}{\rho_k^2} - \frac{\rho e - e_3}{1 - w_3} \frac{dw_3}{dt}. \end{aligned} \quad (12)$$

В этом выражении слагаемые, стоящие под знаком дивергенции, определяют полный поток всех видов эксергии в системе, а слагаемые с множителем T_0 – эксергетические потери, обусловленные необратимостью процессов. Эти потери связаны с теплопроводностью, вязкостью фаз, межфазным теплообменом и трением между фазами.

После упрощений уравнение (12) может быть представлено следующим образом:

$$\rho \frac{de}{dt} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left[q_i \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right) \right] + q_v \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right) - \frac{T_0}{T^2} q_i \frac{\partial T}{\partial x_i},$$

$$q_i = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i}, i = 1, 2, 3. \quad (13)$$

Здесь в правой части выражение под знаком производной – поток эксергии тепла, второе слагаемое – эксергетическая мощность внутренних источников тепла (обратимый источник эксергии) и третье слагаемое – потери эксергетической мощности (необратимый сток эксергии).

Потери эксергетической мощности для всей системы определяется следующим образом:

$$E_{\text{пот}} = -T_0 \int_V \frac{q}{T^2} \frac{\partial T}{\partial x_i} dV = T_0 \lambda \int_V \frac{1}{T^2} \frac{\partial T}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} dV. \quad (14)$$

Рассмотрим эксергетические потери, связанные с процессами теплопроводности при передаче теплоты через поперечное сечение неограниченной пластины без внутренних источников тепла при указанных выше граничных условиях третьего рода. Решение уравнения теплопроводности для рассматриваемого случая имеет вид [5]:

$$\Theta = \frac{1 + \text{Bi}}{2 + \text{Bi}} \frac{1 - \bar{x}}{2 + \text{Bi}} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \left\{ \cos \left[\mu_n (1 - \bar{x}) \right] + \frac{\text{Bi}}{\mu_n} \sin \left[\mu_n (1 - \bar{x}) \right] \right\} \exp -\mu_n^2 \text{Fo}, \quad (19)$$

$$\text{tg} \mu_n = \frac{2\text{Bi}}{\mu_n^2 - \text{Bi}^2}, \quad (20)$$

$$A_n = \frac{1}{\cos \mu_n + \frac{\mu_n}{\sin \mu_n} + \text{Bi} \frac{\sin \mu_n}{\mu_n}}, \quad (21)$$

$$Fo = \frac{at}{\delta^2}; \quad Bi = \frac{\alpha\delta}{\lambda}; \quad \bar{x} = \frac{x}{\delta}, \quad \mu_n = n\pi. \quad (22)$$

$$T = T_0 + \Theta (\theta_1 - T_0), \quad (23)$$

Тогда выражение для потерь эксергетической мощности будет иметь следующий вид:

$$E_{\text{пот}} = \frac{T_0\lambda}{\delta} \int_0^1 d\bar{x} \left\{ -1 - \frac{2+Bi}{Bi h} \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \mu_n \sin \mu_n (1-\bar{x}) - A_n Bi \cos \mu_n (1-\bar{x}) \right] \exp -\mu_n^2 Fo \right\}^2 / \left\{ 1 - \bar{x} + \frac{1}{Bi} + \frac{2+Bi}{Bi} \frac{T_0}{\theta_1 - T_0} - \frac{2+Bi}{Bi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \cos \mu_n (1-\bar{x}) + \frac{Bi}{\mu_n} \sin \mu_n (1-\bar{x}) \right] \exp -\mu_n^2 Fo \right\}^2 \quad (24)$$

При установившемся режиме:

$$\Theta = \frac{1 + Bi (1-\bar{x})}{2 + Bi}. \quad (25)$$

Для потерь эксергетической мощности при установившемся режиме получим следующее выражение:

$$E_{\text{пот}} = \frac{T_0\lambda}{\delta} \int_0^1 \left[\frac{1}{\bar{x} - 1 - \frac{1}{Bi} - \frac{T_0}{\theta_1 - T_0} \frac{2+Bi}{Bi}} \right]^2 d\bar{x} \quad (26)$$

После интегрирования (26) получим формулу для расчета потерь эксергетической мощности:

$$E_{\text{пот}} = \frac{T_0\lambda}{\delta \left[\left(1 + \frac{1}{Bi} + \frac{T_0}{\theta_1 - T_0} \frac{2+Bi}{Bi} \right) \left(\frac{1}{Bi} + \frac{T_0}{\theta_1 - T_0} \frac{2+Bi}{Bi} \right) \right]},$$

В таблице приведены исходные данные для определения потерь эксергетической мощности в процессах теплопроводности для неограниченной пластины при граничных условиях третьего рода при установившемся режиме.

1. Исходные данные для определения потерь эксергетической мощности

Параметр	Размерность	Значение
λ	кВт/м0С	0,04
α	кВт/м2 0С	0,04
δ	м	$2 \cdot 10^{-3}$
T_0	0С	150
θ_1	0С	20

Для приведенных данных потери эксергетической мощности в процессах теплопроводности при передаче теплоты через поперечное сечение неограниченной пластины составляют: $E_{\text{пот}} = 0,7 \cdot 10^{-2}$ кВт.

При наличии в теплоутилизаторе, в среднем, около 50 пластин для потерь эксергетической мощности с учетом аддитивности эксергетических характеристик получаем $E_{\text{пот}} = 0,35$ кВт, что составляет примерно 35% общих потерь эксергетической мощности в теплоутилизаторе. Варьируя указанные в таблице 1 параметры можно снижать потери эксергетической мощности в газоздушном пластинчатом теплоутилизаторе.

Выводы и перспективы. Разработана методика расчета потерь эксергетической мощности в процессах теплопроводности при передаче теплоты

через поперечное сечение неограниченной пластины при граничных условиях третьего рода.

Получены формулы для расчета потерь эксергетической мощности в процессах теплопроводности.

Расчитаны потери эксергетической мощности в процессах теплопроводности в неограниченной пластине при установившемся режиме.

Установлено, что потери эксергетической мощности в процессах теплопроводности составляют примерно 35% общих эксергетических потерь в газовоздушном теплоутилизаторе.

Список использованных источников

1. Дьярмати И. Неравновесная термодинамика / И. Дьярмати. – М.: «Мир». – 1974. – 247 с.
2. Эксергетический метод и его приложения / Под ред. В.М. Бродянского. – М.: «Мир», 1967. – 247 с.
3. Белоусов В.С. Развитие методов эксергетического анализа и исследование процессов в однофазных и дисперсных средах на основе неравновесной термодинамики: автореф. дис. д-ра техн. наук // УГТУ – УПИ. – Екатеринбург, 2003. – 48 с.
4. Степанова А.И. Макроскопическая модель трехфазной термодинамической системы переменной массы / А. И. Степанова // Энергетика і автоматика. – 2016. – №4. – С.133-144.
5. Пехович А. И. Расчеты теплового режима твердых тел. / Пехович А. И., Жидких В.М. –Л.: Энергия, 1976, – 351 с.

References

1. D'yarmati, I. (1974). Neravnovesnaya termodinamika [Nonequilibrium thermodynamics]. Moskow: «Mir», 247.
2. Pod red. V. M. Brodyanskogo. (1967). Eksergeticheskiy metod i ego prilozheniya [The exergy method and its applications]. Moskow: «Mir», 247.
3. Belousov, V.S. (2003). Razvitiye metodov eksergeticheskogo analiza i issledovaniye protsessov v odnofaznykh i dispersnykh sredakh na osnove neravnovesnoy termodinamiki: avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk [Development of methods for exergetic analysis and study of processes in single-phase and disperse media on the basis of nonequilibrium thermodynamics: the author's abstract. UGTU – UPI. Ekaterinburg, 48.

4. Stepanova, A. I. (2016). Makroskopicheskaya model' trekhfaznoy termodinamicheskoy sistemy peremennoy massy [Macroscopic model of a three-phase thermodynamic system of variable mass]. Energetika i avtomatika, 4, 133-144.

5. Pekhovich, A. I., Zhidkikh, V. M. Raschety teplovogo rezhima tverdykh tel [Calculations of the thermal regime of solids]. (1976). Leninhrad.: Energiya,– 351.

ВТРАТИ ЕКСЕРГЕТИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ У ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ З ПЛАСТИНЧАСТИМИ ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРАМИ

Н. М. Фіалко, А. І. Степанова, Р. О. Навродська

Анотація. Проблема розробки ефективних технологій утилізації теплоти відхідних газів енергетичних установок є важливою частиною загальної проблеми модернізації енергетики України. Розробка високоякісного теплоутилізаційного обладнання для енергетичних установок різного типу нерозривно пов'язана з розробкою і використанням ефективних методів оптимізації теплоутилізаційних систем. Ці методи досить різноманітні і можуть бути засновані на комплексних підходах які включають ексергетичні методи в поєднанні з методами термодинаміки незворотних процесів. Сказане визначає актуальність роботи.

Мета роботи - підвищення ефективності роботи пластинчастих теплоутилізаторів шляхом зниження втрат ексергетичної потужності.

У роботі аналізуються втрати ексергетичної потужності в процесах теплопровідності при передачі теплоти через поперечний переріз необмеженої пластини, якою моделювалася пластинчастого теплоутилізатора. Викладаються результати чисельних розрахунків втрат ексергетичної потужності в процесах теплопровідності в необмеженій пластині при граничних умовах третього роду.

Математична модель досліджуваних процесів включає рівняння ексергії, рівняння балансу ексергії і ентропії, рівняння нерозривності трифазної термодинамічної системи при зміні концентрації однієї з фаз, рівняння руху фаз, рівняння енергій, рівняння балансу ентальпій, рівняння Гіббса і рівняння теплопровідності при граничних умовах третього роду.

При отриманні формул для розрахунку втрат ексергетичної потужності використано локальне диференціальне рівняння балансу ексергії трифазної системи зі змінною концентрацією однієї з фаз. У рівнянні одна з складових визначає втрати ексергетичної потужності в системі, які обумовлені необоротністю процесів і пов'язані з теплопровідністю, в'язкістю фаз, міжфазним теплообміном і тертям між фазами. На підставі цього рівняння і розв'язку рівняння теплопровідності при граничних умовах третього роду для необмеженої пластини отримано формули для розрахунку втрат ексергетичної

потужності та розраховано втрати в газоповітряному пластинчатому теплоутилізаторі.

Ключові слова: теплоутилізаційна система, процеси теплопровідності, втрати ексергетичної потужності

LOSS OF EXERGY CAPACITY IN HEAT UTILIZATION SYSTEMS WITH PLATE INSULATED HEAT UTILIZERS

N. Fialko, A. Stepanova, R. Navrodska

Abstract. *The problem of developing efficient technologies for utilizing the heat of waste gases from power plants is an important part of the overall problem of modernizing Ukraine's energy sector. Development of high-quality heat recovery equipment for power plants of various types is inextricably linked with the development and use of effective methods for optimizing heat recovery systems. These methods are quite diverse and can be based on complex approaches that include exergy methods combined with methods of thermodynamics of irreversible processes. This determines the relevance of the work.*

The purpose of the work is to increase the efficiency of the plate heat exchangers by reducing the losses of exergy power.

The work analyses the loss of exergy power in heat conduction processes during the transfer of heat through the cross-section of an unlimited plate. An unlimited plate simulated the gas-air plate heat exchanger plate. The results of numerical calculations of losses of exergic power in heat conduction processes in an unbounded plate under boundary conditions of the third kind are presented.

The mathematical model of the studied processes includes the exergy equation, the balance equation of exergy and entropy, the equation of continuity of a three-phase thermodynamic system with a change in the concentration of one of the phases, the equation of phase motion, the energy equation, the balance equation for enthalpies, the Gibbs equation, and the heat equation for boundary conditions of the third kind.

When obtaining formulas for calculating the losses of exergy power, a local differential equation of the exergy balance of a three-phase system with a variable concentration of one of the phases is used. The derivation of this equation is presented in [1]. In the equation, one of the terms determines the loss of exergy power in the system, these loss are caused by the irreversibility of the processes and are related to the thermal conductivity, phase viscosity, phase-to-phase heat exchange, and friction between phases. Based on this equation and the solution of the heat equation under boundary conditions of the third kind for an unbounded plate, formulas are obtained for calculating the loss of exergy power and the losses in the gas-air plate heat exchanger are calculated.

Key words: *heat recovery system, heat conduction processes, loss of exergy power*