

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

А.И. Степанова, кандидат технических наук

Институт технической теплофизики НАН Украины

e-mail: nmfialko@ukr.net

Аннотация. *Изложены результаты оптимизации элементов теплоутилизационных систем котельных установок и стекловаренных печей. Для оптимизации указанных элементов в работе использованы балансовые методы эксергетического анализа, методы термодинамики необратимых процессов и статистические методов планирования эксперимента.*

Ключевые слова: *эффективность, оптимизация, теплоутилизационная система*

В условиях ограниченности первичных энергоресурсов и тенденции к повышению стоимости топлива в стране проблема минимизации энергопотребления и рационального использования вторичных энергоресурсов приобретает все большее значение. Один из способов решения этой проблемы в области децентрализованной энергетики Украины – создание эффективных энергосберегающих технологий утилизации теплоты отходящих газов и высокоэкономичного теплоутилизационного оборудования для энергетических установок различного типа. Следует отметить, что решение указанной проблемы связано с определенными трудностями, которые обусловлены целым рядом особенностей энергетических установок и конкретных схем утилизации теплоты. Решение о целесообразности реализации той или иной теплоутилизационной схемы и применения теплоутилизаторов определенного типа должно базироваться на всесторонних исследованиях, позволяющих учесть влияние на эффективность теплоутилизации максимально возможного количества факторов. Важным аспектом таких исследований является

оптимизации технологических процессов и соответствующего теплоутилизационного оборудования.

Необходимость оптимизации технологических процессов и энергетических установок определяется сущностью оптимизации, которая состоит в выборе с помощью определенных оценочных критериев таких параметров энергетического объекта, которые обеспечивают его максимальную эффективность. Кроме того, сравнительный анализ работы энергетических объектов одного типа и выбор среди них наиболее эффективных может быть проведен только в том случае, если такие объекты максимально усовершенствованы, то есть их параметры оптимальны. Необходимые оценочные критерии эффективности, которые могли бы служить также целевыми функциями оптимизации, должны быть достаточно чувствительными к изменению определенных параметров объекта, причем настолько, чтобы целесообразность их использования для оптимизации именно этих параметров не оставляла сомнений [1].

Целесообразность разработки новых оценочных критериев эффективности в дополнение к традиционным критериям, таким, например, как критерий Кирпичова в теплотехнике, коэффициенты полезного действия различного вида и т.п., определяется естественным отсутствием универсального критерия для оценки совершенства любого энергетического объекта. Достаточно чувствительными к изменению определенных параметров объекта являются оценочные критерии, которые включают, помимо тепловых характеристик объекта, некоторые эксергетические характеристики. Такими критериями могут быть, например, разработанные для анализа эффективности и оптимизации теплоутилизационных систем эксерго-технологический и тепло-эксергетический критерии оценки эффективности [2-4]:

$$k_{ex}^T = (E_{\text{пот}} m_0) / Q, \quad \varepsilon = E_{\text{пот}} / Q.$$

где $E_{\text{пот}}$ – внутренние потери эксергетической мощности в теплообменнике; m – масса; Q – тепловая мощность.

При использовании указанных критериев в качестве целевых функций оптимизации определяемые оптимальные параметры системы должны соответствовать либо минимуму функциональной зависимости этих критериев от параметров теплоутилизационных систем, либо наименьшему значению функции в пределах заданного интервала параметров. Рациональный выбор методов оптимизации теплоутилизационных установок различной степени сложности повышает результативность оптимизации, так как позволяет использовать при разработке конструкции установки параметры, максимально приближенные к оптимальным.

Для отдельных элементов теплоутилизационных установок могут быть установлены необходимые для оптимизации функциональные зависимости целевых функций от параметров элементов. В качестве методов, использующихся для установления указанных зависимостей, рассматривались следующие методы:

- балансовые методы эксергетического анализа, которые предусматривают составление системы эксергетических, тепловых и материальных балансовых уравнений, дополненной соответствующими гидродинамическими уравнениями и уравнениями теплопередачи;
- методы термодинамики необратимых процессов совместно с эксергетическими методами;
- статистические методы планирования эксперимента.

При наличии указанных функциональных зависимостей общая задача оптимизации для отдельных элементов теплоутилизационной установки может рассматриваться в виде:

$$\vec{K}^{\text{опт}}(\vec{x}_k, \vec{x}_t, \vec{x}_r = f(\vec{x}_k), \vec{x}_p = f(\vec{x}_t)) \rightarrow \min (\max) \vec{K}(\vec{x}_k, \vec{x}_t),$$

$$\vec{x}_k \in X, \quad 0 \leq |X| \leq N_x \angle \infty; \quad \vec{x}_t \in Y, \quad 0 \leq |Y| \leq N_y \angle \infty,$$

где $\vec{K}$ – вектор целевых функций; $\vec{x}_k, \vec{x}_t$ – векторы варьируемых конструктивных и режимных параметров; $\vec{x}_r = f(\vec{x}_k), \vec{x}_p = f(\vec{x}_t)$ –

векторы функций конструктивных и режимных варьируемых параметров;
 X, Y – области существования ограничений; N_x, N_y – границы области существования ограничений.

С помощью балансовых методов для газоздушных теплоутилизаторов с мембранными панелями, входящих в теплоутилизационные системы стекловаренных печей, получены функциональные зависимости эксергетических критериев эффективности, которые служат целевыми функциями оптимизации, от параметров теплоутилизаторов. Далее приведена такая зависимость для эксерго-технологического критерия эффективности:

$$k_{ex}^T = \left\{ \ln \left(1 + \frac{T_{BX}^{ДГ} - T_{BX}^{ВОЗ}}{CT_{BX}^{ВОЗ} \left(1 + \xi \alpha_K^{ДГ} / \alpha_{пр}^{ДГ} F_{II} + 1 / \alpha_K^{ВОЗ} F_{тр}^{ВНУТ} \right)} \right) + \right. \\
+ \ln \left(1 - \frac{T_{BX}^{ДГ} - T_{BX}^{ВОЗ}}{CT_{BX}^{ДГ} \left(1 + \xi \alpha_K^{ДГ} / \alpha_{пр}^{ДГ} F_{II} + 1 / \alpha_K^{ВОЗ} F_{тр}^{ВНУТ} \right)} \right) + \\
\left. + \frac{R \rho^{ВОЗ} w^{ВОЗ 2}}{2 d_1 c_p^{ВОЗ} 1,82 \ln Re^{ВОЗ} - 1,64^2 \mu_M^{ВОЗ} p_{BX}^{ВОЗ}} + D \frac{R \rho^{ДГ} w^{ДГ 2}}{2 \mu_M^{ДГ} p_{BX}^{ДГ} c_p^{ДГ}} \right\} \frac{T_0 m C}{Q}$$

Для шахматного пучка:

$$D = 0,25 z_2 + 1,$$

$$\alpha_{пр}^{ДГ} = 0,127 s_1' / d_2^{-0,7} Re^{ДГ 0,75} \lambda^{ДГ} \left[H + 1,1 F_{тр}^{нар} \frac{1-H}{F_{II}} \right] / d_2,$$

$$F_{мем} = \ln 4 s_2 - 2 d_2, \quad F_{II} = \ln 4 s_2 - 2 d_2 + \pi d_2, \quad h_{мем} = 0,5 \frac{s_2 - d_2}{d_2}.$$

Для коридорного пучка:

$$D = 0,074 \left(\frac{s_1' / d_2 - 1}{s_2' / d_2 - 1} \right)^{-1,5} z_2,$$

$$\alpha_{пр}^{ДГ} = 0,051 Re^{ДГ 0,75} \lambda^{ДГ} \left[H + 1,1 F_{тр}^{нар} \frac{1-H}{F_{II}} \right] / d_2,$$

$$F_{мем} = 2 \ln s_2 - d_2, \quad F_{II} = 2 \ln s_2 - d_2 + 0,5 \pi d_2, \quad h_{мем} = 0,5 \frac{s_2 - d_2}{d_2}.$$

Общие для шахматного и коридорного пучков параметры:

$$\alpha_K^{BO3} = k 0,022 \text{ Re}^{BO3 0,8} \text{ Pr}^{BO3 0,43} \lambda^{BO3} / d_1,$$

$$H = th \text{ } fh_{\text{мем}} / ph_{\text{мем}},$$

$$f = \sqrt{\frac{2\alpha_K^{дг} v_{\text{мем}}}{\lambda_{\text{мем}} b 1 + \xi \alpha_K^{дг}}}, \quad v_{\text{мем}} = \frac{F_{\text{п}}}{F_{\text{мем}}} \left(1 - v_{\text{тр}} \frac{F_{\text{тр}}^{\text{нар}}}{F_{\text{п}}} \right),$$

$$F_{\text{тр}}^{\text{внут}} = l N \pi d_1, \quad F_{\text{тр}}^{\text{нар}} = l N \pi d_2,$$

$$w^{дг} = \text{Re}^{дг} \mu^{дг} / \rho^{дг} d_2, \quad w^{BO3} = \text{Re}^{BO3} \mu^{BO3} / \rho^{BO3} d_1,$$

$$Q = \psi \left(T_{\text{вх}}^{дг} - T_{\text{вх}}^{BO3} \right) / \left(1 + \xi \alpha_K^{дг} / \alpha_{\text{пр}}^{дг} F_{\text{п}} + 1 / \alpha_K^{BO3} F_{\text{тр}}^{\text{внут}} \right).$$

Основные обозначения: b – толщина мембраны; d_1, d_2 – внутренний и наружный диаметры трубы; F – поверхность теплообмена; G – массовый расход теплоносителя; $h_{\text{мем}}$ – высота мембраны; l – длина трубы; N – количество труб; s_1, s_2 – расстояния между панелями или трубами пучка в направлениях, перпендикулярном и параллельном потоку газов; w – скорость; μ_m – молекулярная масса; ξ – коэффициент загрязнения; ρ – плотность. **Индексы верхние:** дг – дымовые газы; возд – воздух; нар – наружная поверхность. **Индексы нижние:** вх, вых – вход, выход; мем – мембрана; п – полная; пот – потери; тр – труба; ex – эксергетический.

В теплоутилизаторах котельных установок, предназначенных для подогрева и увлажнения дутьевого воздуха, в теплоутилизаторах, применяемых в теплоутилизационных схемах для утилизации теплоты отходящих газов стекловаренных печей, и др. в качестве теплоносителей часто используются многофазные среды с переменной концентрацией одной или нескольких фаз, например, запыленные влажные дымовые газы, влагосодержание и степень запыленности которые в процессе прохождения через теплоутилизатор изменяются. В таких многофазных средах существуют одновременно различные термодинамические силы и вызванные ими необратимые потоки,

что позволяет искать функциональные зависимости, необходимые для решения оптимизационных задач, используя методы термодинамики необратимых процессов совместно с эксергетическими методами.

Сформулирована макроскопическая модель и получено дифференциальное уравнения баланса эксергии для трехфазной термодинамической системы переменной массы при изменении концентрации одной из фаз:

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

Здесь I_i – внешние потоки; e – удельная эксергия; P_{ij} – тензор напряжений; p – давление; q_{ij} – межфазная теплота; R_{ij} – сила межфазного взаимодействия; T – температура; t – время; v – скорость; w – концентрация; ρ – плотность; σ – источники эксергии, энтропии; τ_{ij} – тензор вязких напряжений; τ_e – эксергетическая температура; cm – центр масс.

Уравнение учитывает эксергетические потери в термодинамической системе, связанные с теплопроводностью и вязкостью фаз, межфазным теплообменом, трением между фазами и позволяет получить вектор функции изменения режимных параметров теплоутилизационной системы во времени $\vec{x}_t = \vec{f}(t)$.

При использовании статистических методов планирования эксперимента указанные функциональные зависимости в большинстве случаев целесообразно представлять в виде квадратичного полинома, при получении которого используются три варьируемых фактора $n = 3$:

$$f(x_k) = a_0 + \sum_{k=1}^n a_k x_k + \sum_{\substack{i,k=1 \\ i \neq k}}^n a_{ik} x_i x_k + \sum_{k=1}^n a_{kk} x_k^2.$$

В качестве примера приведены полученные функциональные зависимости эксергетических критериев эффективности от конструкционных параметров теплообменной поверхности контактного пластинчатого воздухонагревателя, входящего в теплоутилизационную систему котельной установки. Варьируемые параметры – ширина пластины a , высота пластины b и расстояние между пластинами s :

$$t_0 = -5^{\circ}\text{C}$$

$$\varepsilon = 5,70 \cdot 10^{-1} - 2,88 \cdot 10^{-4}a + 1,07 \cdot 10^{-7}a^2 - 3,34 \cdot 10^{-4}b + 2,32 \cdot 10^{-8}ab + 1,38 \cdot 10^{-7}b^2 + 5,74 \cdot 10^{-2}s - 2,38 \cdot 10^{-5}as - 1,28 \cdot 10^{-5}bs + 1,21 \cdot 10^{-3}s^2;$$

$$k_{ex}^T = 9,82 - 1,68 \cdot 10^{-2}a + 7,27 \cdot 10^{-6}a^2 - 9,43 \cdot 10^{-3}b + 2,76 \cdot 10^{-6}ab + 3,81 \cdot 10^{-6}b^2 + 3,18s - 1,48 \cdot 10^{-3}as - 7,90 \cdot 10^{-4}bs + 6,00 \cdot 10^{-2}s^2;$$

$$t_0 = 5^{\circ}\text{C}$$

$$\varepsilon = 2,70 \cdot 10^{-1} - 1,90 \cdot 10^{-4}a + 8,54 \cdot 10^{-8}a^2 + 2,08 \cdot 10^{-6}b + 8,84 \cdot 10^{-10}ab + 3,61 \cdot 10^{-10}b^2 + 3,07 \cdot 10^{-2}s - 1,19 \cdot 10^{-5}as - 2,00 \cdot 10^{-6}bs + 8,16 \cdot 10^{-6}s^2;$$

$$k_{ex}^T = 9,07 - 1,80 \cdot 10^{-2}a + 8,46 \cdot 10^{-6}a^2 - 9,49 \cdot 10^{-5}b + 5,95 \cdot 10^{-7}ab + 5,98 \cdot 10^{-8}b^2 + 2,90 \cdot 10^{-4}s - 1,29 \cdot 10^{-3}as - 2,24 \cdot 10^{-4}bs - 1,03 \cdot 10^{-5}s^2.$$

Далее для иллюстрации перечисленных методов приведены некоторые графики:

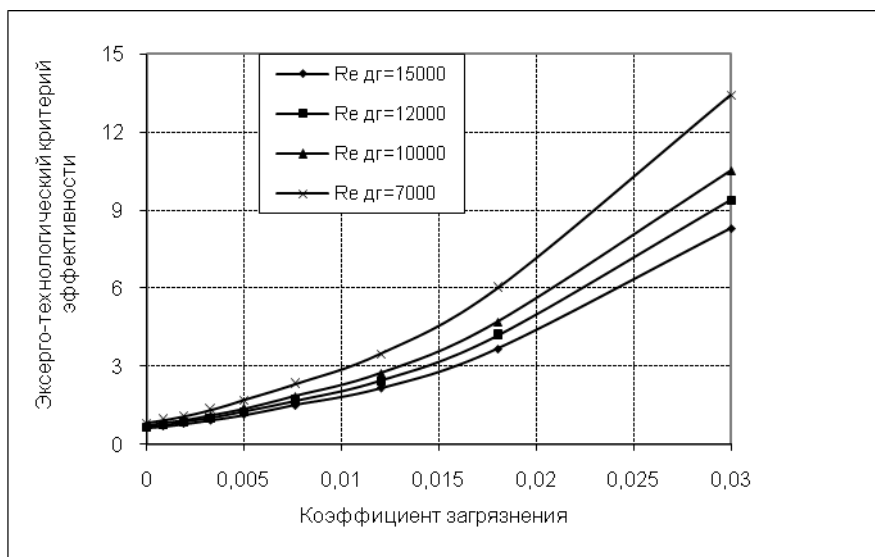


Рис.1 Зависимость эксерго-технологического критерия эффективности k_{ex}^T от коэффициента загрязнения ξ для шахматного трубного пучка газовоздушного теплоутилизатора стекловаренных печей

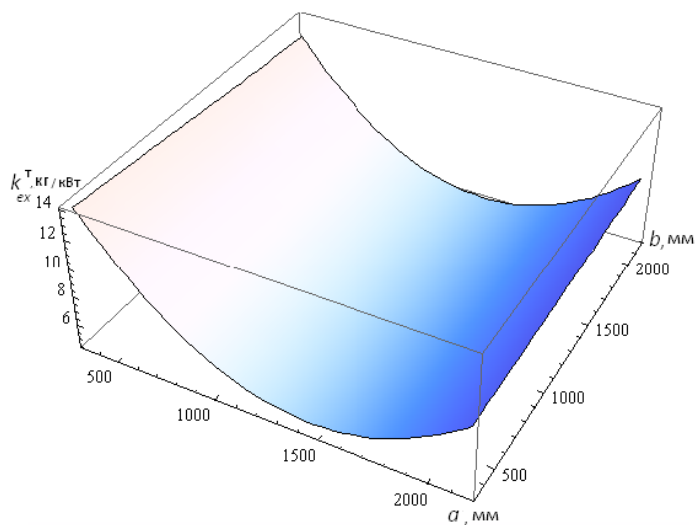


Рис. 2. Зависимость эксерго-технологического критерия эффективности k_{ex}^T от ширины пластины a и высоты пластины b при $s=5\text{ мм}$, $t_0=0^\circ\text{C}$ для контактного пластинчатого воздухонагревателя котельной установки

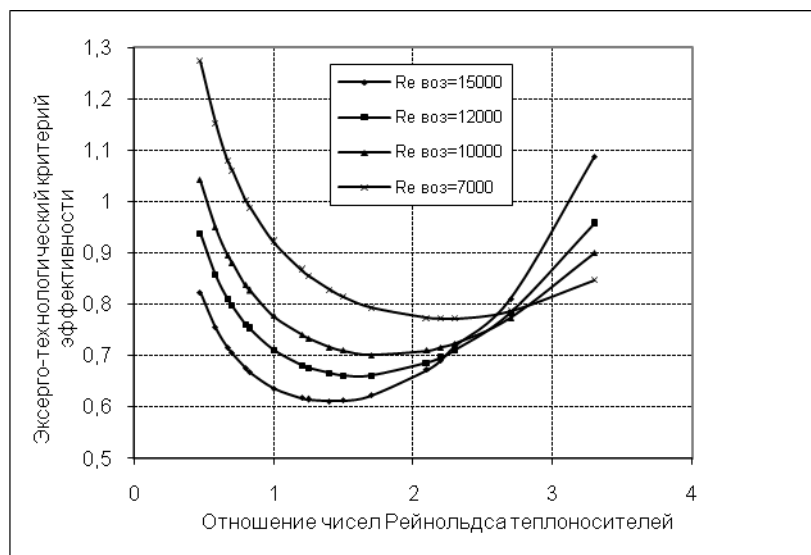


Рис.3. Зависимость эксерго-технологического критерия эффективности k_{ex}^T от отношения чисел Рейнольдса теплоносителей для газовоздушного теплоутилизатора стекловаренных печей

Минимизация полученных функциональных зависимостей позволяет определить оптимальные параметры теплоутилизаторов.

В качестве примера приведены полученные оптимальные параметры и эксергетическая эффективность контактного пластинчатого воздушонагревателя при различных значениях температуры окружающей среды.

Оптимальные параметры и эффективность контактного пластинчатого воздушонагревателя котельной установки

Целевая функция	Температура окружающей среды	a , мм	b , мм	s , мм	Оптимальные значения критерия
ε	$t_0 = -50^\circ\text{C}$	1770	1290	5	0,273
k_{ex}^T , кг/кВт		1430	1240	5	1,57
ε	$t_0 = 00^\circ\text{C}$	1460	1850	5	0,303
k_{ex}^T , кг/кВт		1380	2000	5	4,60
ε	$t_0 = 50^\circ\text{C}$	1410	2000	5	0,330
k_{ex}^T , кг/кВт		1320	2000	5	5,72

Выводы

Проведен анализ различных аспектов оптимизации теплоутилизационных систем энергетических установок, на основании которого установлены методы, которые могут быть использованы для оптимизации отдельных элементов теплоутилизационных систем.

С помощью балансовых методов эксергетического анализа, методов термодинамики необратимых процессов и статистических методов планирования эксперимента получены функциональные зависимости критериев оценки эффективности от параметров различных теплоутилизаторов, входящих в теплоутилизационные системы котельных установок и стекловаренных печей.

На основе полученных функциональных зависимостей исследованы закономерности влияния параметров исследуемых теплоутилизаторов на их эксергетическую эффективность и определены оптимальные значения этих параметров.

Список литературы

1. Эксергетический расчет технических систем: Справочное пособие / под ред. А.А. Долинского. – К.: Наукова Думка, 1991. – 360 с.
2. Комплексный подход к оценке эффективности систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок / Н.М. Фиалко, Ю.В. Шеренковский, А.И. Степанова А.И. и др. // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2008. – №5. – С. 22 – 28.
3. Основные принципы создания теплоутилизационных технологий для котельных малой энергетики / А.А. Долинский, Н.М. Фиалко, Р.А. Навродская, Г.А. Гнедаш // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, №4. – С. 27 – 34.
4. Сравнительный анализ эффективности теплоутилизационного оборудования стекловаренных печей на основе использования различных критериев эффективности / Н.М. Фиалко, Ю.В. Шеренковский, Р.А. Навродская и др. // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т. 32, №2. – С. 42 – 50.

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

А.І. Степанова

Анотація. Викладено результати оптимізації елементів теплоутилізаційних систем котельних установок та скловарених печей. Для оптимізації вказаних елементів в роботі використано балансові методи ексергетичного аналізу, методи термодинаміки не обернених процесів та статистичні методи планування експерименту.

Ключові слова: *ефективність, оптимізація, теплоутилізаційна система*

OPTIMIZATION OF ELEMENTS OF HEAT RECOVERY OF POWER PLANTS

A. Stepanova

Annotation. The results of the optimization elements heat recovery systems, boiler plants and glass furnaces. To optimize these elements used in the balance exergy analysis methods, methods of irreversible thermodynamics and statistical methods of experiment planning.

Key words: *efficiency, optimization, thermoutilyzing boiler system*