

УДК 621.036.7

**Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И.,  
Навродская Р.А., Шевчук С.И., Новаковский М.А.**

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОУТИЛИЗАЦИОННОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
РАЗЛИЧНЫХ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

Викладено результати порівняльного аналізу ефективності теплоутилізаторів різного типу, які входять до складу систем утилізації теплоти відкидних газів скловарильних печей, та наведено дані, отримані в результаті розв'язання оптимізаційних задач, що використовують як цільові функції оптимізації основні критерії ефективності теплоутилізаційного обладнання.

Изложены результаты сравнительного анализа эффективности теплоутилизаторов различного типа, входящих в системы утилизации теплоты отходящих газов стекловаренных печей, и приведены данные, полученные в результате решения оптимизационных задач, использующих в качестве целевых функций оптимизации основные критерии эффективности теплоутилизационного оборудования.

Results of comparative analysis of the efficiency for different kind of heat utilizers contained to system of heat utilization of glass furnace are exposed. Results demonstrated at the given paper are obtained as a solution of optimizing problems. The main criteria of efficiency of equipment for utilizing of heat were used as a criterion function.

$c_p$  – удельная изобарная теплоемкость;

$d$  – диаметр трубы;

$E$  – эксергетическая мощность;

$G$  – массовый расход теплоносителя;

$F$  – поверхность теплообмена;

$F_{Re}$  – фактор аналогии Рейнольдса;

$k$  – энергетический критерий Кирпичова;

$k_{ex}^T$  – эксерго-технологический критерий;

$k_{ex}$  – эксергетический критерий;

$m$  – масса;

$m_0$  – удельная материалоемкость;

$N$  – мощность, затрачиваемая на прокачку теплоносителей;

$Nu$  – число Нуссельта;

$n$  – количество элементов в технологической системе;

$p$  – давление;

$Q$  – тепловая мощность;

$R$  – газовая постоянная;

$s_1$  – расстояние между панелями или трубами пучка в направлении, перпендикулярном потоку газов;

$s_2$  – расстояние между трубами в панели или

пучке в продольном направлении;

$T$  – температура;

$T_0$  – температура окружающей среды;

$\Delta T$  – среднелогарифмический температурный напор;

$V$  – объем;

$\Delta$  – изменение величины;

$\varepsilon$  – тепло-эксергетический критерий;

$\eta_{ex}$  – эксергетический КПД;

$\mu$  – молекулярная масса;

$\xi$  – коэффициент сопротивления.

**Индексы верхние:**

дг – дымовые газы;

воз – воздух.

**Индексы нижние:**

вх, вых – входной, выходной параметр;

зат – затраты;

опт – оптимальное значение величины;

пол – полезные эффекты;

пот – потери;

ср – среднее значение величины;

эт – эталонный образец;

ex – эксергетический.

На существующем этапе развития народного хозяйства государственная программа комплексной модернизации коммунальной теплоэнергетики Украины предполагает необходимость разработки и внедрения эффективных схем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок [1]. Разработка указанных схем возможна только на основе новых современных методических подходов к анализу эффективности и оптимальному проектированию теплоутилизационного оборудования.

В настоящее время эффективность систем утилизации теплоты оценивается целым рядом критериев, которые предполагают, главным образом, один из следующих подходов к их построению: термодинамический, эксергетический, теплотехнический, технологический, экономический. Термодинамический подход лежит в основе различных модификаций термодинамического КПД. Эксергетический подход включает различные типы эксергетических КПД. Наиболее распространенные – эксергетический КПД, в котором используются суммарные эксергетические потоки на входе и выходе системы, а также разностный эксергетический КПД, использующий понятия возрастания получаемой эксергии и уменьшения расходуемой эксергии, т.е. понятия полезной и затраченной эксергии:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n E_{\text{ивых}}}{\sum_{i=1}^n E_{\text{ивх}}}; \quad \eta = \frac{\sum_{i=1}^n E_{\text{ипол}}}{\sum_{i=1}^n E_{\text{изат}}} \quad (1)$$

Первый определяет степень термодинамического совершенства системы, но имеет существенный недостаток – он не отражает процесса с точки зрения его целевого назначения. Второй отражает степень реализации поставленной цели, однако не применим для процессов, в которых существует неоднозначность в трактовке полезных эффектов и затрат.

Основанные на теплотехническом подходе критерии эффективности включают такие параметры утилизационных систем, как тепловая мощность, мощность на прокачку теплоносителей, температурный напор, полезная и

затрачиваемая тепловые мощности и др.:

$$k = Q / N; \quad k = Q / N\Delta T; \quad k = Q_{\text{пол}} / Q_{\text{зат}} \quad (2)$$

Технологический подход положен в основу критериев, включающих массогабаритные показатели теплоутилизаторов:

$$m_0 = m / Q; \quad k = Q / V \quad (3)$$

Широкое распространение в практике теплообмена для оценки эффективности теплотехнического оборудования получили критерии, основанные на сопоставлении различных параметров в рассматриваемой и эталонной установке:

$$\begin{aligned} k &= Q / Q_0, \quad k_N = N / N_0, \quad k_F = F / F_0, \\ k_{\text{Nu}} &= \text{Nu} / \text{Nu}_0, \quad k_\xi = \xi / \xi_0, \\ F_{\text{Re}} &= (\text{Nu} / \text{Nu}_0) / (\xi / \xi_0). \end{aligned} \quad (4)$$

Применение критериев (1-4) для оценки эффективности теплоутилизационного оборудования различного типа предполагает наличие многочисленных дополнительных условий, обеспечивающих корректность сравнительного анализа. В настоящее время распространение получил эксергоэкономический подход, позволяющий при оценке эффективности технологической системы основываться на экономических и эксергетических показателях [2]. В качестве эксергоэкономических критериев оценки эффективности энергетической установки обычно выбирают комбинации стоимостных показателей эксергии и общих стоимостных показателей капитальных инвестиций, связанных с разработкой, сооружением и эксплуатацией энергоустановки.

В работах [3-5] предложен комплексный подход, позволяющий при анализе эффективности теплоутилизационного оборудования учитывать совместно несколько различных аспектов: а именно, термодинамический, теплотехнический и технологический. На основе указанного подхода разработаны критерии эффективности, которые используются для оценки эффективности теплоутилизационных систем энергетических

установок, а также при решении оптимизационных задач с целью оптимального проектирования теплоутилизационного оборудования.

Данная работа посвящена сравнительному анализу эффективности теплоутилизационного оборудования различного типа с оптимальными геометрическими параметрами теплообменной поверхности, полученными в результате решения оптимизационных задач, в которых в качестве целевых функций оптимизации используются различные критерии эффективности; а также выяснению степени влияния конструктивных параметров теплоутилизаторов на критерии эффективности и установлению на этой основе критериев, наиболее чувствительных к изменению указанных параметров.

Рассматривалось теплоутилизационное оборудование для стекловаренной печи, представляющее собой концевой рекуператор, предназначенный для предварительного нагрева воздуха, который поступает в регенераторы печи. Поверхность нагрева рекуператора представляла собой в первом случае трубный пучок, во втором – пучок панелей, образованных с помощью труб, соединенных мембранами. Рассматривалось два варианта труб: гладкие и с внутренней кольцевой накаткой. При компоновке панелей и трубных пучков использовалось шахматное и коридорное расположение труб с противоточным движением теплоносителей: воздух – в трубах, дымовые газы – в межтрубном пространстве. Таким образом, сравнительный анализ проводился для восьми вариантов теплоутилизационного оборудования, для каждого из которых определялись зависимости целевых функций оптимизации от некоторых независимых факторов и решались

соответствующие оптимизационные задачи. В качестве независимых факторов были выбраны следующие геометрические параметры теплообменной поверхности: расстояние  $s_1$  между панелями или трубами пучка в направлении, перпендикулярном направлению движения дымовых газов; расстояние  $s_2$  между трубами в панели или пучке в направлении, совпадающем с направлением движения дымовых газов; и величина диаметра труб  $d$ . Интервалы изменения параметров теплообменной поверхности выбирались с учетом реальных требований к эксплуатации теплоутилизаторов:  $60 \text{ мм} \leq s_1 \leq 120 \text{ мм}$ ;  $60 \text{ мм} \leq s_2 \leq 120 \text{ мм}$ ;  $30 \text{ мм} \leq d \leq 42 \text{ мм}$ . В качестве целевых функций оптимизации было выбрано несколько критериев оценки эффективности:

- энергетический критерий Кирпичова  $k = Q/N$ ;
- технологический критерий  $m_0 = m/Q$ ;
- тепло-эксергетический критерий  $\varepsilon = E_{\text{пот}}/Q$ ;
- эксерго-технологический критерий  $k_{\text{ex}}^T = E_{\text{пот}} m_0/Q$ ;
- эксергетический критерий  $k_{\text{ex}} = \eta_{\text{ex}}/\eta_{\text{ex}}^{\text{ид}}$

Для расчета величины потерь эксергетической мощности  $E_{\text{пот}}$ , значение которой входит в тепло-эксергетический и эксерго-технологический критерии эффективности, использовались аналитические зависимости, полученные с учетом уравнения состояния идеального газа, поскольку в области изменения рабочих параметров дымовые газы и воздух с достаточной степенью точности можно считать идеальным газом.

$$E_{\text{пот}} = G^{\delta,2} \left[ c_{\text{рсп}}^{\delta,2} (T_{\text{ex}}^{\delta,2} - T_{\text{вых}}^{\delta,2}) - T_0 \left( c_{\text{рсп}}^{\delta,2} \ln \frac{T_{\text{ex}}^{\delta,2}}{T_{\text{вых}}^{\delta,2}} - \frac{R}{\mu^{\delta,2}} \ln \frac{P_{\text{ex}}^{\delta,2}}{P_{\text{вых}}^{\delta,2}} \right) \right] - G^{\text{гоз}} \left[ c_{\text{рсп}}^{\text{гоз}} (T_{\text{вых}}^{\text{гоз}} - T_{\text{ex}}^{\text{гоз}}) - T_0 \left( c_{\text{рсп}}^{\text{гоз}} \ln \frac{T_{\text{вых}}^{\text{гоз}}}{T_{\text{ex}}^{\text{гоз}}} - \frac{R}{\mu^{\text{гоз}}} \ln \frac{P_{\text{вых}}^{\text{гоз}}}{P_{\text{ex}}^{\text{гоз}}} \right) \right] \quad (5)$$

Выражение для эксергетического критерия  $k_{ex}$ , при построении которого используются разностные эксергетические КПД исследуемого теплообменника и теплообменника с высокой степенью идеальности, получено с учетом следующих обстоятельств. Выражение для разностного эксергетического КПД:

$$\eta_{ex} = \frac{G^{ВОЗ} \left[ c_{рсп}^{ВОЗ} (T_{ВЫХ}^{ВОЗ} - T_{ВХ}^{ВОЗ}) - T_0 \left( c_{рсп}^{ВОЗ} \ln \frac{T_{ВЫХ}^{ВОЗ}}{T_{ВХ}^{ВОЗ}} - \frac{R}{\mu^{ВОЗ}} \ln \left( \frac{\Delta p^{ВОЗ}}{p_{ВХ}^{ВОЗ}} + 1 \right) \right) \right]}{G^{Д.Г} \left[ c_{рсп}^{Д.Г} (T_{ВХ}^{Д.Г} - T_{ВЫХ}^{Д.Г}) - T_0 \left( c_{рсп}^{Д.Г} \ln \frac{T_{ВХ}^{Д.Г}}{T_{ВЫХ}^{Д.Г}} - \frac{R}{\mu^{Д.Г}} \ln \left( \frac{\Delta p^{Д.Г}}{p_{ВЫХ}^{Д.Г}} + 1 \right) \right) \right]} \quad (6)$$

Для противоточного теплообменника с высокой степенью идеальности можно полагать, что потери на трение  $\Delta p^{Д.Г}$ ,  $\Delta p^{ВОЗ}$  бесконечно малы, а выходная температура греющего теплоносителя приближается к входной температуре воспринимающего, и наоборот  $T_{ВЫХ}^{Д.Г} \approx T_{ВХ}^{ВОЗ}$ ;  $T_{ВХ}^{Д.Г} \approx T_{ВЫХ}^{ВОЗ}$ , тогда выражение для эксергетического критерия следующее

$$k_{ex} = \frac{T_{ВЫХ}^{ВОЗ} - T_{ВХ}^{ВОЗ} - T_0 \left( \ln \frac{T_{ВЫХ}^{ВОЗ}}{T_{ВХ}^{ВОЗ}} - \frac{R}{\mu^{ВОЗ} c_{рсп}^{ВОЗ}} \ln \frac{p_{ВЫХ}^{ВОЗ}}{p_{ВХ}^{ВОЗ}} \right)}{T_{ВХ}^{Д.Г} - T_{ВЫХ}^{Д.Г} - T_0 \left( \ln \frac{T_{ВХ}^{Д.Г}}{T_{ВЫХ}^{Д.Г}} - \frac{R}{\mu^{Д.Г} c_{рсп}^{Д.Г}} \ln \frac{p_{ВХ}^{Д.Г}}{p_{ВЫХ}^{Д.Г}} \right)} \quad (7)$$

При достаточной близости двух оценочных характеристик – разностного эксергетического КПД (6) и предложенного эксергетического критерия (7), полученное выражение для эксергетического критерия представляется более наглядным и простым, а применение указанного критерия – целесообразным для оценки эффективности теплоутилизационного оборудования, использующего в качестве теплоносителей газовые среды.

Исходные параметры, используемые для получения характеристик, входящих в указанные критерии эффективности, следующие:

нагреваемая среда – воздух, поступающий в регенераторы стекловаренной печи;

температура дымовых газов на входе в теплоутилизатор – 400 °С;

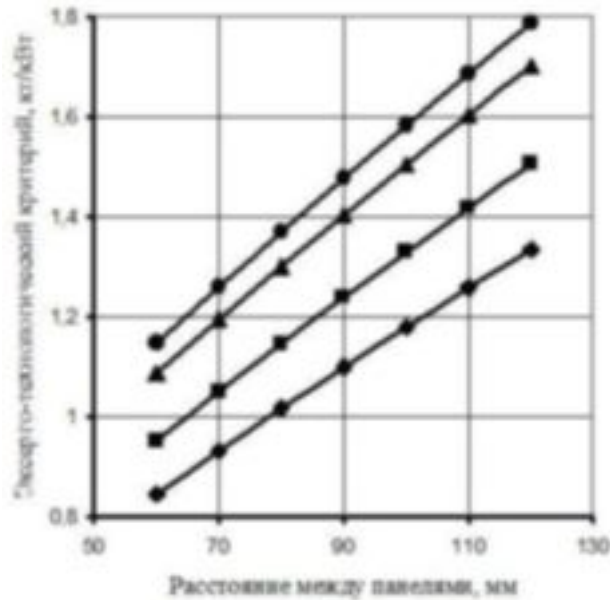
температура воздуха на входе в теплоутилизатор – 20 °С;

массовый расход дымовых газов – 3,12 кг/с;

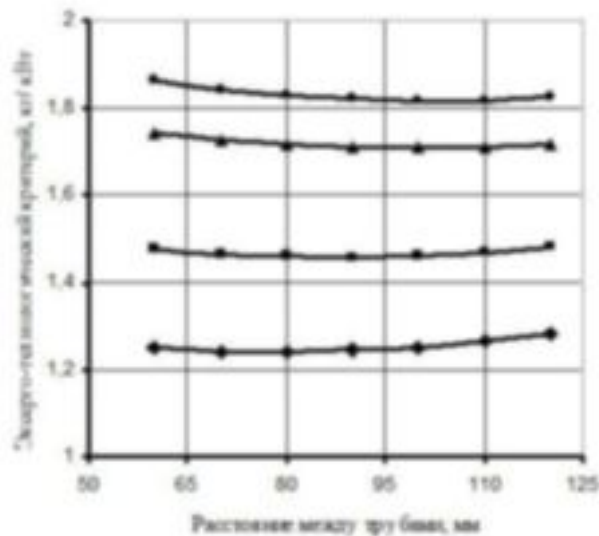
массовый расход воздуха – 3,39 кг/с;

температура окружающей среды – 20 °С.

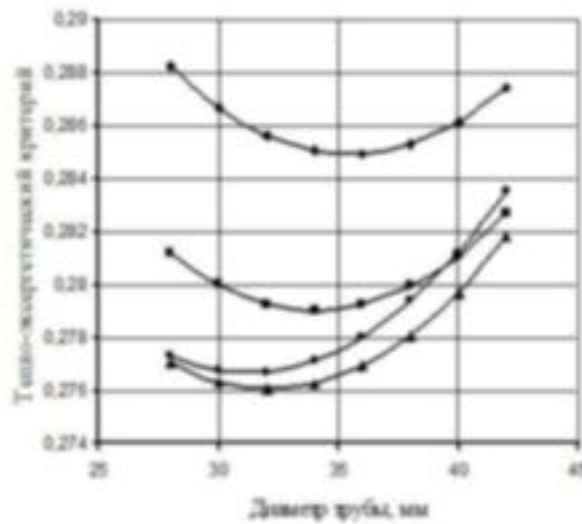
С помощью статистических методов планирования эксперимента выполнены исследования, позволяющие получить функциональные зависимости указанных критериев эффективности (целевых функций оптимизации) от геометрических параметров теплообменной поверхности теплоутилизаторов (независимых факторов). На рис. 1-3 представлены некоторые из полученных функциональных зависимостей. Для полученных функций решались оптимизационные задачи. Для энергетического критерия Кирпичова и эксергетического критерия определялся максимум функции, для технологического, тепло-эксергетического и эксерго-технологического критериев – минимум. Оптимальные значения геометрических параметров поверхности теплообмена, являющиеся результатом решения оптимизационной задачи для каждой из полученных функциональных зависимостей, и критерии эффективности, соответствующие найденным оптимальным параметрам, представлены в табл. 1.



**Рис. 1. Зависимость эксерго-технологического критерия от расстояния между панелями  $s_1$  в направлении перпендикулярном движению дымовых газов для рекуператора с мембранами, коридорным расположением труб в пучке и внутренними кольцевыми турбулизаторами:**  
 ◆ –  $s_2 = 60,0$  мм,  $d = 30,0$  мм; ■ –  $s_2 = 60,0$  мм,  $d = 35,0$  мм;  
 ● –  $s_2 = 60,0$  мм,  $d = 40,0$  мм; ▲ –  $s_2 = 60,0$  мм,  $d = 42,0$  мм.



**Рис. 2. Зависимость эксерго-технологического критерия от расстояния между трубами  $s_2$  в панели или в пучке в направлении движения дымовых газов для рекуператора без мембран, с коридорным расположением труб в пучке и без внутренних кольцевых турбулизаторов:**  
 ◆ –  $s_1 = 60,0$  мм,  $d = 30,0$  мм; ■ –  $s_1 = 60,0$  мм,  $d = 35,0$  мм;  
 ● –  $s_1 = 60,0$  мм,  $d = 40,0$  мм; ▲ –  $s_1 = 60,0$  мм,  $d = 42,0$  мм.



**Рис. 3. Зависимость тепло-энергетического критерия от диаметра труб  $d$  для рекуператора с мембранами, шахматным расположением труб в пучке и внутренними кольцевыми турбулизаторами:**

- ◆ –  $s_1 = 60,0$  мм,  $s_2 = 60,0$  мм; ■ –  $s_1 = 60,0$  мм,  $s_2 = 80,0$  мм;
- –  $s_1 = 60,0$  мм,  $s_2 = 120,0$  мм; ▲ –  $s_1 = 60,0$  мм,  $s_2 = 107,4$  мм.

В столбцах "1" приведены данные для рекуператоров с гладкими трубами, в столбцах "2" – данные для рекуператоров, имеющих трубы с внутренней кольцевой накаткой.

В качестве основных показателей, определяющих возможность использования критериев для оценки эффективности теплоутилизаторов определенного типа, можно принять чувствительность критериев к изменению конструктивных параметров теплоутилизатора и возможность при использовании критериев как целевых функций оптимизации получать оптимальные значения геометрических параметров теплообменной поверхности, находящиеся внутри заданного интервала.

Полученные результаты позволили провести сравнительный анализ эффективности теплоутилизаторов, установить степень влияния на критерии эффективности геометрических параметров теплообменной поверхности, наличия мембран в трубном пучке, способа компоновки труб в пучке, наличия внутренних кольцевых турбулизаторов в трубах, и определить на этой основе критерии, наиболее чувстви-

тельные к изменению указанных параметров.

Для всех рассмотренных критериев их зависимость от величины расстояния  $s_1$  между панелями или трубами пучка в направлении, перпендикулярном направлению потока дымовых газов носит монотонный характер, при этом величины критериев эффективности существенно изменяются при изменении  $s_1$  (рис. 1). Оптимальное значение величины  $s_1$  совпадает с нижней границей исследуемого интервала или, как в случае коридорного пучка для рекуператора без мембран, близко к ней. Исключение представляет энергетический критерий эффективности  $k$ , для которого значения  $s_{1\text{опт}}$  совпадают с верхней границей исследуемого интервала, что свидетельствует о существенном уменьшении мощности на прокачку теплоносителя при увеличении расстояния между панелями или трубами пучка в направлении, перпендикулярном направлению движения дымовых газов. Наиболее чувствительными к изменению параметра  $s_1$  являются энергетический критерий  $k$  и эксерготехнологический критерий  $k_{\text{ex}}^T$ . В пределах за-

Табл. 1. Оптимальные конструктивные параметры теплоутилизаторов, рассчитанные на основе использования различных критериев эффективности

Используемый критерий	Оптимальный параметр	Рекуператор без мембран				Рекуператор с мембранами			
		Шахматный пучок		Коридорный пучок		Шахматный пучок		Коридорный пучок	
		1	2	1	2	1	2	1	2
$k$	$s_1$ , мм	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
	$s_2$ , мм	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
	$d$ , мм	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0		42,0	42,0
	$k_{\text{опт}}$	67,8	76,3	63,2	70,0	74,9	84,9	70,9	80,5
$m_0$	$s_1$ , мм	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
	$s_2$ , мм	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
	$d$ , мм	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
	$m_{\text{опт}}^*$ , кг/кВт	3,16	2,49	3,30	2,63	3,56	2,75	3,69	2,86
$\varepsilon$	$s_1$ , мм	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
	$s_2$ , мм	60,0	60,0	86,3	96,3	120,0	107,4	120,0	120,0
	$d$ , мм	30,0	37,5	33,3	40,2	30,0	32,2	30,0	32,2
	$\varepsilon_{\text{опт}}$	0,353	0,291	0,363	0,299	0,332	0,276	0,335	0,274
$k_{\text{ex}}^T$	$s_1$ , мм	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
	$s_2$ , мм	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
	$d$ , мм	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
	$k_{\text{exопт}}^T$ , кг/кВт	1,12	0,749	1,24	0,825	1,21	0,786	1,27	0,844
$k_{\text{ex}}$	$s_1$ , мм	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
	$s_2$ , мм	60,0	60,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
	$d$ , мм	34,8	40,1	37,6	42,0	30,0	34,8	30,0	35,8
	$k_{\text{exопт}}$	0,339	0,441	0,327	0,431	0,366	0,463	0,367	0,468

данного интервала изменения  $s_1$  энергетический критерий изменяется примерно в 4 раза, эксерго-технологический критерий – в среднем, в 1,5 раза, остальные критерии изменяют-

ся на 15...20 %.

Величина расстояния  $s_2$  между трубами в панели или пучке в направлении, совпадающем с направлением движения дымовых газов, для

всех рассмотренных критериев, практически, не оказывает влияния на эффективность теплоутилизаторов (рис. 2). Тепло-эксергетический и эксерго-технологический критерии имеют слабо выраженные минимумы при различных значениях  $s_2$  для рекуператоров различных типов. Для остальных случаев оптимальные значения параметра  $s_2$  совпадают либо с нижней границей исследуемого интервала, либо с его верхней границей. При наличии мембран в трубном пучке только критерии  $k_{ex}^T$  и  $m_0$ , включающие массу теплообменной поверхности, реагируют на изменение величины расстояния  $s_2$ , то есть на увеличение длины мембран. При увеличении  $s_2$  величины критериев  $k_{ex}^T$  и  $m_0$  увеличивается, что свидетельствует о снижении эффективности теплоутилизатора.

Наиболее чувствительным к изменению величины диаметра труб  $d$  являются энергетический критерий  $k$ , который с увеличением  $d$  в пределах заданного интервала увеличивается, в среднем, в 4 раза, что свидетельствует о существенном повышении эффективности теплоутилизатора. Это связано с более быстрым ростом тепловой мощности вследствие увеличения поверхности теплообмена при увеличении диаметра труб по сравнению с ростом мощности на прокачку теплоносителя при соответствующем уменьшении проходного сечения дымовых газов. Эксерго-технологический и технологический критерии, включающие массу теплообменной поверхности, при увеличении диаметра труб увеличиваются на 37...40 %, что свидетельствует о снижении эффективности теплоутилизатора. Остальные критерии мало чувствительны к изменению величины  $d$  (изменение в пределах заданного интервала составляет, в среднем, 3...4 %).

Наличие мембран в трубном пучке повышает теплотехническую и термодинамическую эффективность теплоутилизатора, о чем свидетельствуют, примерно, с одинаковой чувствительностью критерии  $k$ ,  $\varepsilon$ ,  $k_{ex}^T$ , но снижает его эксерго-технологическую и технологическую эффективность, что связано с доминирующим

влиянием массы теплообменной поверхности, величина которой входит в критерии  $k_{ex}^T$  и  $m_0$ . Этот вывод справедлив для шахматного и коридорного пучков, а также для труб с внутренними турбулизаторами и без них.

Чувствительными к изменению способа компоновки труб в пучке являются энергетический критерий  $k$  и эксерго-технологический критерий  $k_{ex}^T$ . Значения этих критериев свидетельствуют о несколько более высокой эффективности (на 5...10 %) теплоутилизаторов с шахматной компоновкой труб в пучке по сравнению с коридорной. Остальные критерии оказываются практически нечувствительными к изменению способа компоновки труб.

Наличие внутренних кольцевых турбулизаторов наиболее существенно сказывается на эксерго-технологическом и тепло-эксергетическом критериях. Значения эксерго-технологического критерия при наличии внутренних кольцевых турбулизаторов, в среднем, на 51 %, а тепло-эксергетического на 21 % ниже (соответственно эффективность теплоутилизатора выше), чем в случае их отсутствия.

Таким образом, степень чувствительности исследуемых критериев эффективности к изменению параметров поверхности теплообмена теплоутилизаторов различна, наиболее чувствительными к изменению конструктивных параметров являются энергетический критерий Кирпичова  $k$  и предложенный авторами эксерго-технологический критерий  $k_{ex}^T$ .

Что касается возможности использования критериев как целевых функций оптимизации для получения значений оптимальных параметров внутри заданного интервала, то проведенные исследования позволили установить следующее. Для энергетического критерия  $k$  и для критерия  $m_0$  в пределах исследуемого интервала конструктивных параметров экстремумы не наблюдаются, максимальное значения  $k$  совпадает с верхней границей интервала, минимальное значение  $m_0$  – с нижней границей. В некоторых случаях экстремумы наблюдаются для эксерго-технологического критерия  $k_{ex}^T$  и эксергетического критерия  $k_{ex}$ . Наиболее про-



дуктивно в данном случае использование тепло-эксергетического критерия  $\epsilon$ , позволяющего определить оптимальные геометрические параметры в пределах исследуемого интервала (рис. 3).

### **Выводы**

1. В качестве основных показателей, определяющих возможность использования для оценки эффективности теплоутилизаторов различного типа определенных критериев эффективности, предложено принять чувствительность указанных критериев к изменению конструктивных параметров теплоутилизатора и возможность при использовании критериев как целевых функций оптимизации получать оптимальные значения геометрических параметров теплообменной поверхности, находящиеся внутри заданного интервала.

2. Показано, что степень чувствительности различных критериев эффективности к изменению конструктивных параметров теплоутилизационного оборудования стекловаренных печей различна, что влечет за собой необходимость в каждом конкретном случае использовать для оценки эффективности определенный критерий.

3. Установлено, что эксерго-технологический и энергетический критерии являются наиболее чувствительными к изменению конструктивных параметров теплоутилизационных систем. Использование тепло-эксергетического критерия эффективности в качестве целевой функции оптимизации позволяет, в отличие от остальных критериев, определить минимум функции при значениях конструктивных параметров, лежащих внутри исследуемого интервала.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. *Долінський А.А.* Державна програма комплексної модернізації комунальної теплоенергетики України // Сб. трудов 18-ой международной конференции "Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики"- Киев.: ИПЦ АЛКОН, 2008. – С.12-16.

2. *Долинский А.А.* К вопросу эксергоэкономической оптимизации энергетических систем // Промышленная теплотехника. – 2009. – т.31. – №4. – с.105-108.

3. *Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Навродская Р.А., Голубинский П.К., Новаковский М.А.* Эффективность систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок различного типа // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 3. – С. 68–76.

4. *Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Голубинский П.К., Навродская Р.А., Новаковский М.А.* Комплексный подход к оценке эффективности систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок // Экологические технологии и ресурсосбережение. – 2008. – №5. – С. 22–28.

5. *Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Навродская Р.А., Шевчук С.И., Новаковский М.А.* Эффективность систем утилизации теплоты отходящих газов стекловаренных печей // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, №4. – С. 78–85.

*Получено 01.02.2010 г.*