

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

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Для теплоутилизаторів різного типу, що входять до складу систем утилізації теплоти відхідних газів скловарних печей, за допомогою методів планування експерименту та регресійного аналізу отримано залежності ексерго-технологічного критерію ефективності від основних конструктивних параметрів поверхні теплообміну. Проведено оптимізацію ексерго-технологічного критерію та визначено оптимальні конструктивні параметри. З урахуванням додаткових технологічних та експлуатаційних факторів встановлено раціональні області зміни параметрів.

Для теплоутилизаторов различного типа, входящих в системы утилизации теплоты отходящих газов стекловаренных печей, с помощью методов планирования эксперимента и регрессионного анализа получены зависимости эксерго-технологического критерия эффективности от основных конструктивных параметров поверхности теплообмена. Проведена оптимизация эксерго-технологического критерия и определены оптимальные конструктивные параметры. С учетом дополнительных технологических и эксплуатационных факторов установлены рациональные области изменения параметров.

For different types of heat utilizers, included in the systems for the utilization of the heat of flue gases of glass furnaces, by the methods of experiment planning and regressive analysis, dependences of the exergy-technological criterion of efficiency at the basic design parameters of heat exchange surface are obtained. Optimization of exergy-technological criterion is carried out executed, and the optimum design parameters are obtained. With regard for additional technological and operating factors, the rational areas of change in the parameters are established.

a_{ik} — коэффициенты уравнения регрессии в физических переменных;

b_{ik} — коэффициенты уравнения регрессии в кодовых переменных;

d — диаметр трубы;

E — эксергетическая мощность;

k_{ex}^T — эксерго-технологический критерий;

m_0 — удельная материалоемкость;

N — число точек плана;

n — число независимых параметров;

Q — тепловая мощность;

s_1 — расстояние между панелями или трубами пучка в направлении, поперечном потоку газов;

s_2 — расстояние между трубами в панели или пучке в продольном направлении;

X_i — кодовая переменная;

x_i — физическая переменная;

y — функция отклика;

δ — относительное отклонение.

Индексы нижние:

опт — оптимальное значение;

пот — потери.

Разработка эффективных энергосберегающих технологий и высокоэкономичного оборудования для тепловых установок различного типа является неотъемлемой частью общей проблемы энергосбережения в Украине. Важный аспект этой проблемы в децентрализованной энергетике — повышение эффективности использования топлива за счет создания технологий утилизации теплоты отходящих газов, представляющей основную часть потерь теплоты во многих энергетических установках. Так, потери теплоты с отхо-

дящими газами в промышленных печах различного назначения в настоящее время составляют 25...85%. Недостаточный уровень использования тепловых вторичных энергоресурсов в таких энергоустановках связан главным образом либо с низкой эффективностью теплоутилизационного оборудования, либо с его отсутствием. В то же время известно, что использование систем теплоутилизации отходящих дымовых газов, например, на стекловырабатывающих предприятиях Украины и РФ, где существует потребность в теп-

ловой энергии на отопление и горячее водоснабжение, обеспечивает повышение коэффициента использования теплоты топлива на 25...30% при средних капитальных затратах 500 тыс. грн на 1 Гкал/ч установленной мощности водогрейного теплоутилизационного оборудования и сроке окупаемости затрат на его внедрение, не превышающем 1 года. Полезно теплота может также использоваться для нагрева воздуха, идущего на горение в печи, что позволяет повысить КПД печи на 15...20% при таком же сроке окупаемости затрат на установку воздухогрейных теплоутилизаторов. Для Украины как энергодефицитной страны, обладающей при этом необходимым потенциалом для реализации эффективных технологий утилизации сбросной теплоты, в том числе и в стекольной отрасли, проблема их разработки и внедрения актуальна как в настоящее время, так и на ближайшую перспективу. Эксплуатация теплоутилизаторов на стекольных предприятиях связана с определенными трудностями, которые обусловлены высоким уровнем запыленности отходящих газов стекловаренных печей и значительным содержанием в них коррозионно активных соединений, в частности серы. Указанные трудности усиливаются необходимостью соблюдения технологического режима печи при работе теплоутилизационного оборудования. Возможность и целесообразность применения теплоутилизаторов конкретного типа должны определяться в каждом случае индивидуально.

Цель работы – сравнительный анализ эксерго-технологической эффективности теплоутилизаторов различного назначения для стекловаренных печей на основе определения их оптимальных конструктивных параметров.

В работе рассматривались три вида теплоутилизаторов: водотрубный и воздухоотрубный панельные теплоутилизаторы модульного типа, в которых панели образуются с помощью труб, соединенных мембранами, а также воздухоотрубный теплоутилизатор без мембран. При компоновке панелей и обычных трубных пучков в теплоутилизаторах используется шахматное и коридорное расположение труб (рис. 1). Греющим теплоносителем в теплоутилизаторах являются дымовые газы, которые омывают наружную поверхность панелей или трубного пучка без мембран. Нагре-

ваемым теплоносителем в водогрейных теплоутилизаторах служит вода, в воздухогрейных – воздух. Движение нагреваемого теплоносителя осуществляется в трубах теплоутилизационного устройства. В водогрейных теплоутилизаторах применяются гладкие трубы, а в воздухогрейных – трубы с кольцевыми интенсификаторами теплообмена, позволяющими увеличить коэффициент теплоотдачи внутри трубы в 1,5...2 раза. Водотрубный теплоутилизатор состоит из трех, воздухоотрубный – из двух модулей, расположенных вертикально в ряд и соединенных между собой. Для панельных теплоутилизаторов теплообменная часть каждого модуля набирается из секций в виде панелей с коллекторами. Водотрубный теплоутилизатор используется для нагрева воды систем теплоснабжения, воздухоотрубный – для нагрева дутьевого воздуха, поступающего в регенератор печи. Обеспечение высокой эффективности теплоутилизатора при использовании теплообменных элементов – панелей соответствующей геометрии требует решения оптимизационной задачи, т. е. определения оптимальных конструктивных параметров поверхности теплообмена, использующихся при проектировании указанных теплоутилизаторов.

При постановке оптимизационной задачи необходимо выделить основные переменные, значения которых изменяются в достаточно широком интервале и определяются внешними факторами [1]. В данной работе в качестве основных переменных (независимых факторов), изменяющихся в заданном интервале, выбраны определяющие конструктивные параметры поверхности теплообмена: расстояние s_1 между панелями или трубами пучка в направлении, поперечном направлению потока газов, расстояние s_2 между трубами в панели или пучке в продольном направлении относительно потока газов и величина диаметра труб d (см. рис. 1). В качестве целевой функции оптимизации (функции отклика) выбран комплексный эксерго-технологический

критерий $k_{ex}^T = \frac{E_{пот} m_0}{Q}$, предложенный авторами и

ранее использовавшийся для определения оптимальных геометрических параметров оребренной поверхности теплообмена конденсационного поверхностного теплоутилизатора котельной уста-

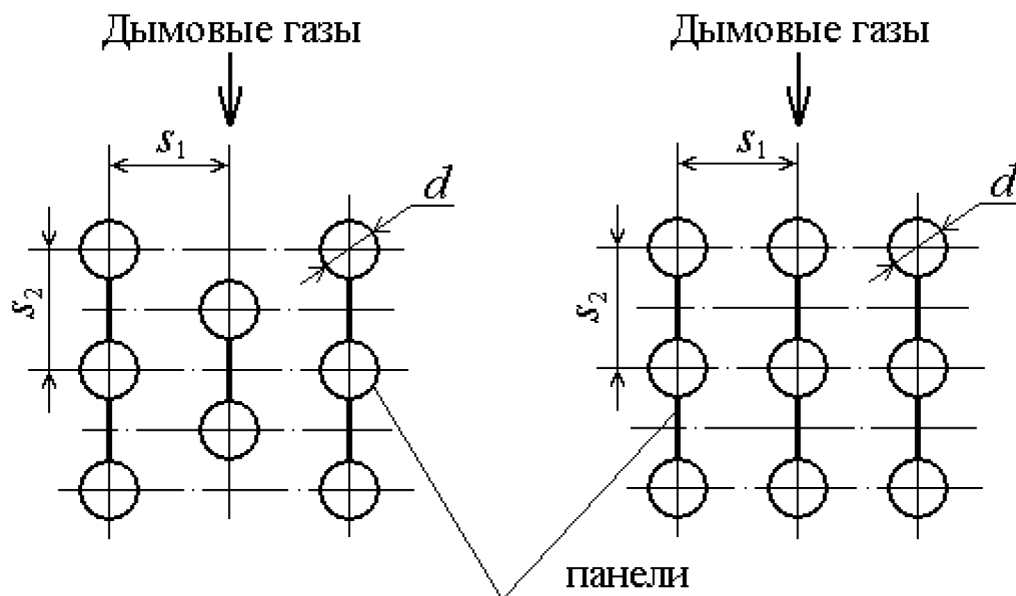


Рис. 1. Схема компоновки панелей в теплоутилизаторах:
 а – шахматное расположение труб;
 б – коридорное расположение труб.

Табл. 1. Условия проведения исследований

Уровень варьирования	Фактор		
	s_1 , мм	s_2 , мм	d , мм
Верхний уровень x_i^B	120	120	42
Нижний уровень x_i^H	60	60	30
Основной уровень, нулевая точка x_{i_0}	90	90	36
Звездные точки x_i^B x_i^H	126,5	126,5	43,3
	53,6	53,6	28,7
Интервал варьирования δ_i	30	30	6

новки [2, 3]. Комплексный эксерго-технологический критерий включает основные наиболее общие термодинамические, теплотехнические и технологические характеристики теплоутилизационной системы. Это позволяет использовать данный критерий в качестве достаточно надежного показателя эффективности указанной системы при решении оптимизационной задачи. В данной работе математическая модель исследуемых объектов с учетом гипотезы о незначимости тройного взаимодействия задавалась в виде квадратичной функции (уравнения регрессии):

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{\substack{i,k=1 \\ i \neq k}}^n a_{ik} x_i x_k + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2. \quad (1)$$

С помощью статистических методов планирования эксперимента выполнены исследования и соответствующие преобразования, позволяющие провести расчет коэффициентов уравнений регрессии [4, 5]. С этой целью использован ортогональный центральный композиционный план, критерием оптимальности которого является ортогональность столбцов

Табл. 2. Объединенная матрица планирования

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1^*	X_2^*	X_3^*	y_u					
1	1	-1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	0,637	0,706	1,10	1,13	0,819	0,911
2	1	1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	0,733	0,837	1,47	1,24	0,837	0,912
3	1	-1	1	-1	0,27	0,27	0,27	1,280	0,902	2,80	2,03	1,22	1,43
4	1	1	1	-1	0,27	0,27	0,27	1,300	0,926	3,10	2,06	1,21	1,44
5	1	-1	-1	1	0,27	0,27	0,27	0,570	0,615	1,25	1,39	1,15	1,21
6	1	1	-1	1	0,27	0,27	0,27	0,658	0,713	1,56	1,55	1,18	1,22
7	1	-1	1	1	0,27	0,27	0,27	1,200	0,753	2,55	2,35	1,63	1,99
8	1	1	1	1	0,27	0,27	0,27	1,187	0,782	2,90	2,53	1,65	1,83
9	1	-1,215	0	0	0,75	-0,73	-0,73	0,900	0,748	1,76	1,73	1,20	1,40
10	1	1,215	0	0	0,75	-0,73	-0,73	0,971	0,820	2,18	1,83	1,23	1,35
11	1	0	-1,215	0	-0,73	0,75	-0,73	0,579	0,687	1,17	1,21	0,920	0,968
12	1	0	1,215	0	-0,73	0,75	-0,73	1,266	0,818	2,90	2,27	1,44	1,65
13	1	0	0	-1,215	-0,73	-0,73	0,75	0,961	0,823	2,02	1,61	1,02	1,17
14	1	0	0	1,215	-0,73	-0,73	0,75	0,861	0,679	1,99	1,97	1,46	1,59
15	1	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	0,907	0,747	1,92	1,76	1,21	1,35

матрицы планирования, что достигается за счет специальным образом выбранного звездного плеча. Величина звездного плеча используется для преобразования квадратичных факторов и свободного члена.

Интервалы изменения параметров поверхности теплообмена (уровни варьирования факторов) для исследуемых теплоутилизаторов были одинаковыми и выбирались с учетом реальных требований к их эксплуатационным и конструктивным особенностям (табл. 1).

Для каждого из шести исследуемых случаев была составлена матрица планирования эксперимента. В табл. 2 приведена объединенная матрица планирования.

В столбцах 9, 10 приведены усредненные по трем параллельным испытаниям значения целевой функции оптимизации y_u (эксерго-технологического критерия k_{ex}^T) для водотрубного панельного теплоутилизатора с шахматным и коридорным расположением труб, в столбцах 11, 12 – аналогичные данные для воздухотрубного

Табл. 3. Коэффициенты уравнений регрессии в физических переменных

Коэффициенты уравнения регрессии	Водотрубный панельный теплоутилизатор		Воздухотрубный панельный теплоутилизатор		Воздухотрубный теплоутилизатор без мембран	
	Шахмат. пучок	Коридор. пучок	Шахмат. пучок	Коридор. пучок	Шахмат. пучок	Коридор. пучок
a_0	$-3,97 \cdot 10^{-1}$	$8,72 \cdot 10^{-1}$	1,09	1,20	$5,44 \cdot 10^{-1}$	$6,18 \cdot 10^{-1}$
a_1	$8,40 \cdot 10^{-3}$	$-1,41 \cdot 10^{-3}$	$-1,64 \cdot 10^{-3}$	$-6,39 \cdot 10^{-3}$	$-1,34 \cdot 10^{-3}$	$5,36 \cdot 10^{-4}$
a_2	$1,01 \cdot 10^{-2}$	$4,96 \cdot 10^{-3}$	$2,55 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$6,91 \cdot 10^{-3}$	$7,47 \cdot 10^{-3}$
a_3	$6,17 \cdot 10^{-3}$	$-1,34 \cdot 10^{-2}$	$-8,61 \cdot 10^{-2}$	$-5,22 \cdot 10^{-2}$	$-2,72 \cdot 10^{-2}$	$-3,48 \cdot 10^{-2}$
a_{12}	$-2,45 \cdot 10^{-5}$	$-2,44 \cdot 10^{-5}$	$-4,16 \cdot 10^{-6}$	$-8,32 \cdot 10^{-6}$	$-3,88 \cdot 10^{-6}$	$-2,36 \cdot 10^{-5}$
a_{13}	$-2,84 \cdot 10^{-4}$	$-1,93 \cdot 10^{-5}$	$-6,94 \cdot 10^{-6}$	$1,39 \cdot 10^{-4}$	$2,22 \cdot 10^{-5}$	$-1,04 \cdot 10^{-4}$
a_{23}	$-3,54 \cdot 10^{-5}$	$-5,42 \cdot 10^{-5}$	$-4,79 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$2,44 \cdot 10^{-4}$
a_{11}	$2,71 \cdot 10^{-5}$	$3,01 \cdot 10^{-5}$	$4,36 \cdot 10^{-5}$	$2,21 \cdot 10^{-5}$	$6,75 \cdot 10^{-6}$	$2,60 \cdot 10^{-5}$
a_{22}	$1,73 \cdot 10^{-5}$	$6,49 \cdot 10^{-6}$	$9,24 \cdot 10^{-5}$	$-7,96 \cdot 10^{-6}$	$-1,95 \cdot 10^{-5}$	$-2,35 \cdot 10^{-5}$
a_{33}	$2,18 \cdot 10^{-4}$	$1,34 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$	$7,41 \cdot 10^{-4}$	$6,39 \cdot 10^{-4}$	$7,47 \cdot 10^{-4}$

панельного теплоутилизатора, в столбцах 13, 14 – для воздухотрубного теплоутилизатора без мембран. В каждой серии испытаний осуществлялась рандомизация порядка проведения опытов. Оценка однородности дисперсий на каждом уровне факторов проводилась по критерию Кохрена. Коэффициенты для уравнений регрессии в кодовых переменных рассчитывались по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \left(\sum_{u=1}^N X_0 y_u - \sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^n b_i X_{ui}^2 \right);$$

$$b_{ik} = \frac{\sum_{u=1}^N X_{ui} X_{uk} y_u}{\sum_{u=1}^N (X_{ui} X_{uk})^2}; \quad b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{ui} y_u}{\sum_{u=1}^N X_{ui}^2}; \quad b_{ii} = \frac{\sum_{u=1}^N X_{ui}^* y_u}{\sum_{u=1}^N (X_{ui}^*)^2}.$$

Проверка значимости коэффициентов уравнений регрессии проводилась по критерию Стьюдента, проверка адекватности полученных уравнений использованным данным – по критерию Фишера. Переход в уравнениях регрессии от ко-

довых переменных к физическим осуществлялся в соответствии с формулой $X_i = (x_i - x_{i0}) / \delta_i$. В табл. 3 приведены результаты расчета коэффициентов уравнений регрессии в физических переменных.

Подстановка полученных коэффициентов в уравнение (1) дает возможность для каждого из шести исследуемых случаев получить зависимость эксерго-технологического критерия эффективности k_{ex}^T от расстояний s_1, s_2 и величины диаметра трубы d . На рис. 2 приведены некоторые из полученных поверхностей, иллюстрирующие зависимости эксерго-технологического критерия от двух параметров: расстояния между трубами s_2 и диаметра трубы d при заданном значении расстояния $s_1 = 60$ мм. Оптимальные значения указанных параметров, являющиеся результатом решения оптимизационной задачи для каждого из полученных уравнений, представлены в табл. 4.

Использование в качестве целевой функции оптимизации эксерго-технологического критерия, учитывающего термодинамические, тепло-

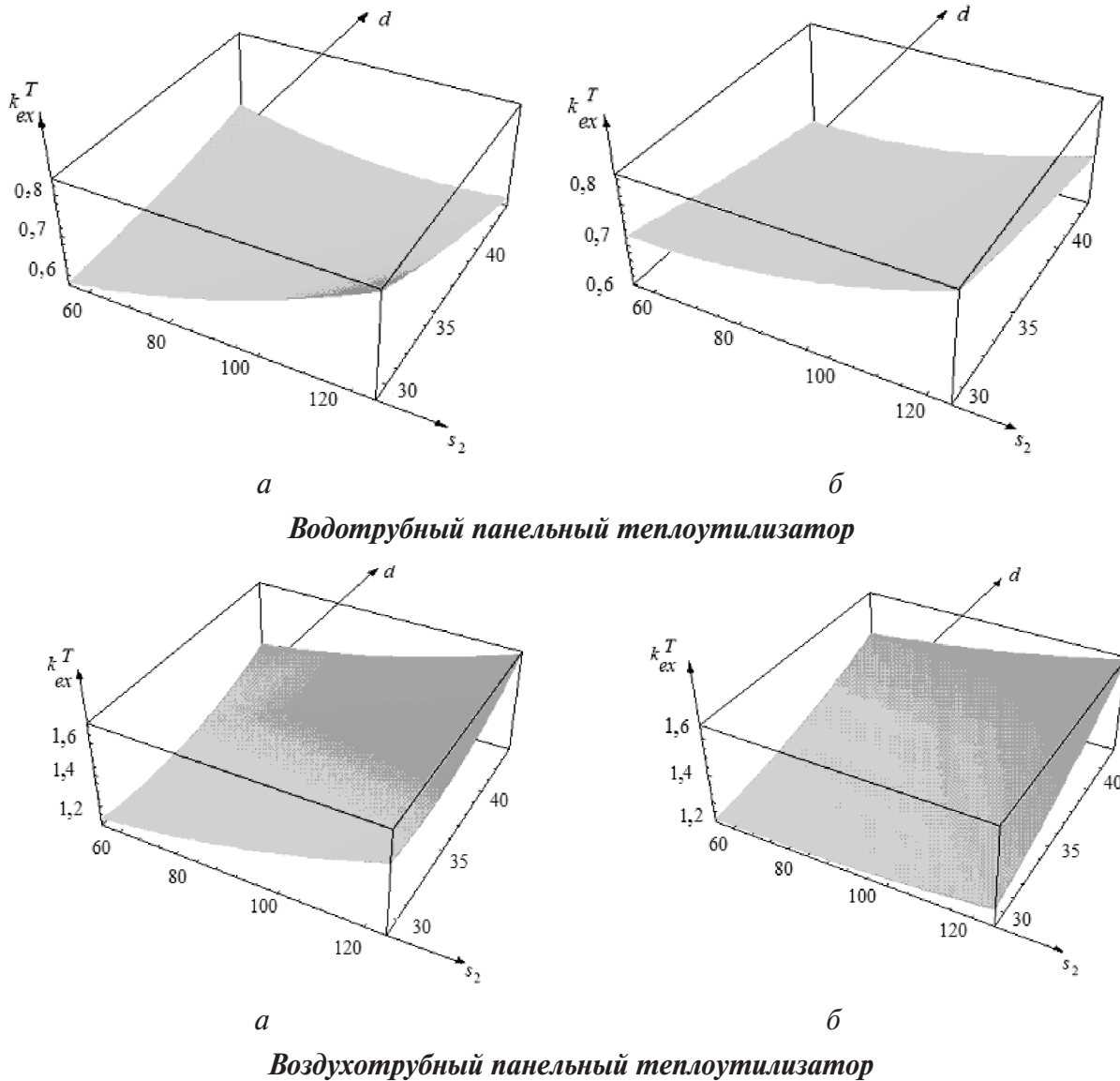


Рис. 2. Зависимость эксерго-технологического критерия эффективности от расстояния между трубами s_2 и диаметра трубы d при $s_1 = 60$ мм: *а* – шахматный пучок; *б* – коридорный пучок.

технические и технологические характеристики теплоутилизационной системы, позволяет дать сравнительную количественную оценку эффективности исследуемых теплоутилизаторов.

Наиболее эффективными по комплексному эксерго-технологическому критерию, как и следовало ожидать, являются водогрейные теплообменные аппараты. Так, для водотрубных теплоутилизаторов значение k_{ex}^T , соответствующее полученным оптимальным параметрам, в 1,4...1,9 раза меньше, чем для газогазовых теп-

лообменников (воздухотрубных теплоутилизаторов).

Для всех исследуемых аппаратов увеличение поперечного расстояния s_1 между трубами в пучке (панелями) в заданном интервале его значений при различных значениях других параметров приводит к монотонному возрастанию величины эксерго-технологического критерия эффективности k_{ex}^T . Таким образом, наименьшее значение показателя k_{ex}^T в заданном интервале значений s_1 достигается на нижней границе дан-

Табл. 4. Результаты решения оптимизационной задачи

Оптимальный параметр	Водотрубный панельный теплоутилизатор		Воздухотрубный панельный теплоутилизатор		Воздухотрубный теплоутилизатор без мембран	
	Шахм. пучок	Коридор. пучок	Шахм. пучок	Коридор. пучок	Шахм. пучок	Коридор. пучок
$s_{1\text{опт}}$, мм	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
$s_{2\text{опт}}$, мм	72,9	61,2	60,0	60,0	67,8	76,8
$d_{\text{опт}}$, мм	38,3	42,0	32,9	30,0	30,0	30,0
k_{ex}^T , кг/кВт	0,601	0,616	1,10	1,16	0,823	0,897

ного интервала. При изменении величины продольного расстояния между трубами s_2 и диаметра трубы d в пределах рассматриваемых интервалов наблюдается минимум эксерго-технологического критерия.

Для водогрейного теплоутилизатора оптимальное значение расстояния между трубами в панели $s_{2\text{опт}}$ выше при шахматном расположении труб в пучке по сравнению с коридорным. Что касается оптимальных значений диаметра труб $d_{\text{опт}}$, то здесь картина противоположная, минимум k_{ex}^T достигается при меньших значениях $d_{\text{опт}}$ для шахматного пучка по сравнению с коридорным. С теплотехнической точки зрения полученные факты качественно вполне объяснимы. Большее значение диаметра труб d в коридорном пучке при заданном расстоянии между панелями s_1 приводит к увеличению поверхности теплообмена, а также к уменьшению поперечного сечения для прохода газов и увеличению их скорости и, следовательно, к увеличению теплоотдачи по газовой стороне при относительно частом расположении труб в панели пучка (малых значениях s_2). В шахматном пучке за счет более эффективного теплообмена по сравнению с коридорным пучком минимальное значение k_{ex}^T достигается при меньшей поверхности нагрева пучка (при меньшем d и более редком расположении труб в пучке, соответствующем большим значениям s_2).

Для газогазовых теплоутилизаторов картина несколько иная. При коридорном расположении труб в пучке воздухотрубного панельного теплоутилизатора наименьшее значение k_{ex}^T соответствует самым низким значениям всех рассматри-

ваемых геометрических параметров в рассматриваемых интервалах. Для шахматного пучка наблюдается минимум эксерго-технологического критерия при значении $d_{\text{опт}} = 32,9$ мм и при значениях остальных параметров, соответствующих нижним границам исследуемых интервалов. Для воздухотрубного теплоутилизатора без мембран как для шахматного, так и для коридорного пучков наблюдаются минимум k_{ex}^T при значениях $s_{2\text{опт}} = 67,8$ мм, $s_{2\text{опт}} = 76,8$ мм и значениях остальных параметров, соответствующих нижним границам исследуемых интервалов.

Эксерго-технологический анализ эффективности применения оребрения (мембран) в поверхностях нагрева воздухотрубных теплоутилизаторов показал, что значения комплексного эксерго-технологического критерия для теплоутилизаторов с трубными пучками без оребрения примерно на 25% ниже по сравнению с теплоутилизаторами, включающими мембранные поверхности нагрева. Более высокая эксерго-технологическая эффективность воздухотрубного теплоутилизатора с трубными пучками без оребрения связана в основном с меньшими значениями его материалоемкости, поскольку с точки зрения эксергетической и теплотехнической эффективности существенных различий между рассматриваемыми теплоутилизаторами не наблюдается (коэффициенты теплоотдачи с внутренней и внешней стороны в данном случае примерно равны). Однако, несмотря на меньшую эксерго-технологическую эффективность панельных теплоутилизаторов с мембранами, их применение вызвано эксплуатационной необходимостью, а именно более высокой

Табл. 5. Рациональные области изменения конструктивных параметров поверхности теплообмена для теплоутилизаторов стекловаренных печей

Рациональная область изменения	Водотрубный панельный теплоутилизатор		Воздухотрубный панельный теплоутилизатор		Воздухотрубный теплоутилизатор без мембран	
	Шахм. пучок	Коридор. пучок	Шахм. пучок	Коридор. пучок	Шахм. пучок	Коридор. пучок
s_1 , мм	60...63	60...63	60...63	60...63	60...63	60...63
s_2 , мм	68...78	60...70	60...70	60...70	63...73	72...82
d , мм	37...39	40...42	32...34	30...32	30...32	30...32

эффективностью очистки поверхностей нагрева сжатым воздухом при использовании данного оборудования для охлаждения запыленных дымовых газов стекловаренного производства.

Учет технологических особенностей и особенностей эксплуатации теплоутилизационного оборудования в конкретных условиях приводит к необходимости нахождения рациональной области изменения конструктивных параметров поверхности теплообмена. Эта область определяется на основе полученных оптимальных значений конструктивных параметров. Ее ширина зависит от указанных особенностей и от степени изменения эксерго-технологического критерия эффективности в пределах области. Наиболее широкую рациональную область изменения значений параметров, лежащих в рамках рассматриваемого интервала, можно указать для величины расстояния s_2 (табл. 5). В пределах этой области относительное отклонение δk_{ex}^T фактического значения k_{ex}^T от значения $k_{ex\text{ опт}}^T$, соответствующего оптимальным параметрам, не превышает 0,2%. Для расстояния s_1 между трубами величина δk_{ex}^T в рациональной области не превышает 5,0%. И для диаметра труб d максимальная величина δk_{ex}^T составляет 0,3%.

Выводы

1. На основе оптимизации эксерго-технологического критерия эффективности получены оптимальные значения и рациональные области изменения конструктивных параметров поверх-

ности теплообмена теплоутилизаторов различного типа для стекловаренных печей.

2. Проведен сравнительный анализ эксерго-технологической эффективности теплоутилизаторов различного назначения (водотрубного и воздухотрубного панельных теплоутилизаторов, а также воздухотрубного теплоутилизатора без мембран).

ЛИТЕРАТУРА

1. Долинский А.А., Драганов Б.Х., Дубровин В.А. Оптимизация технических систем методами эксергоэкономики // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25, № 5. – С. 57–60.
2. 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.
3. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Навродская Р.А., Голубинский П.К., Новаковский М.А. Оптимизация конструктивных параметров конденсационного теплоутилизатора котельной установки // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 3. – С. 48–54.
4. Налимов В.В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 207 с.
5. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента. – М.: Металлургия, 1981. – 151 с.

Получено 26.02.2009 г.