

# Энергосберегающие технологии

УДК 621.036.7

## Эффективность теплоутилизаторов различного типа для стекловаренных печей

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

*Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев*

Изложены результаты сравнительного анализа эффективности панельных теплоутилизаторов для стекловаренных печей: водотрубного и воздухотрубного. Приведены данные по эффективности теплоутилизаторов с оптимальными конструктивными характеристиками теплообменной поверхности, полученными в результате решения оптимизационных задач для различных критериев эффективности.

**Ключевые слова:** утилизация теплоты, критерий оценки эффективности, теплоутилизатор.

Викладено результати порівняльного аналізу ефективності панельних теплоутилізаторів для скловарних печей: водотрубного та повітрянотрубного. Наведено дані щодо ефективності теплоутилізаторів з оптимальними конструктивними характеристиками, отриманими в результаті розв'язання оптимізаційних задач для різних критеріїв ефективності.

**Ключові слова:** утилізація теплоти, критерій оцінки ефективності, теплоутилізатор.

Наблюдаемый в настоящее время в Украине недостаточный уровень использования тепловых вторичных энергоресурсов связан, главным образом, либо с низкой эффективностью теплоутилизационного оборудования энергетических установок, либо с его отсутствием. Украина обладает необходимым потенциалом для реализации эффективных энергосберегающих технологий утилизации теплоты, в связи с чем проблема их разработки и внедрения является актуальной для энергетики страны. Решение этой проблемы связано с необходимостью системных исследований, касающихся анализа эффективности теплоутилизационного оборудования с позиций современных комплексных методических подходов, включающих в качестве одного из основных эксергетический подход.

Необходимость качественно оценивать различные качественно неравноценные по их

взаимопревращаемости энергоресурсы теплотехнических устройств: потоки технической работы, потоки теплоты различного потенциала, материальные потоки рабочих сред различной физико-химической природы и различного термодинамического состояния, а также необходимость выбора величин, которые позволяли бы объективно сопоставлять в количественных оценках качественно неравноценные энергоресурсы по физически однородным категориям, обусловили быстрое развитие, совершенствование и внедрение в различные отрасли промышленности эксергетических методов термодинамического анализа. Эксергетические методы позволяют, с одной стороны, решать общие проблемы оптимального проектирования энергетических установок, с другой, дают возможность оценить степень термодинамического несовер-

шенства отдельных элементов установки и наметить пути их оптимизации [1, 2].

При комплексном анализе эффективности теплоутилизационных систем и при решении оптимизационных задач целесообразно использовать в качестве целевых функций оптимизации основные характеристики систем, объединенные в соответствующие критерии. Получение функциональных зависимостей критериев эффективности от независимых параметров теплоутилизационной системы позволяет решить оптимизационную задачу и определить оптимальные значения указанных параметров. В работах [3–6] разработаны комплексный подход и методика построения критериев оценки эффективности систем утилизации теплоты, включающих основные энергетические, теплотехнические и технологические характеристики систем, предложены и используются для анализа эффективности следующие критерии:

– тепло-энергетический

$$\varepsilon = E_{\text{пот}} / Q;$$

– эксерго-технологический

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

Указанные критерии позволяют анализировать теплоутилизационные системы с различных позиций: термодинамической, теплотехнической, технологической — и могут быть использованы для оценки эффективности теплоутилизационных систем различного типа, в частности, теплоутилизационного оборудования стекловаренных печей, а также качестве целевых функций оптимизации для получения оптимальных конструктивных параметров теплообменной поверхности.

Утилизация теплоты отходящих газов стекловаренных печей является одним из важнейших направлений повышения экономичности типового оборудования стекольного производства с целью экономии топливно-энергетических и материальных ресурсов.

В настоящее время КПД стекловаренных печей различного назначения (для выплавки обыкновенного стекла, медицинских изделий, хрусталя, эмалей и др.) не превышает 60 %, температура отходящих газов, как правило, составляет 250–600 °С, а потери теплоты с отходящими газами — 25–85 %. Утилизация теплоты отходящих газов и ее полезное использование могут в значительной степени компенсировать потребности стекловырабатывающих предприятий в тепловой энергии на отопление и горячее водоснабжение, на производство которой в настоящее время в котельных затрачиваются

дополнительные топливно-энергетические ресурсы. Целесообразность и возможность использования теплоты отходящих газов стекловаренных печей доказана положительным зарубежным и отечественным опытом эксплуатации теплоутилизационных установок. Эксплуатация теплоутилизаторов на стекловырабатывающих предприятиях связана с определенными трудностями, которые обусловлены высокой запыленностью отходящих газов стекловаренных печей и высокой степенью технологического уноса, что является причиной образования загрязняющего слоя на теплообменных поверхностях, а также высоким содержанием в отходящих газах коррозионноактивных соединений, в частности, серы, углерода, фтора и других вредных и химически агрессивных веществ в газообразной фазе. Указанные трудности усиливаются необходимостью соблюдения технологического режима эксплуатации печи при работе теплоутилизаторов.

Обеспечение высокой эффективности работы теплоутилизаторов в различных тепловых схемах требует, во-первых, определения оптимальных конструктивных параметров поверхности теплообмена, использующихся при разработке и проектировании указанных теплоутилизаторов, во-вторых, учета дополнительных технологических факторов таких, как потребность в определенном виде теплоносителя, стоимость топлива и др.

Цель настоящей работы — разработка рекомендаций по применению в схемах утилизации теплоты отходящих газов стекловаренных печей водотрубного и воздухотрубного панельных теплоутилизаторов модульного типа с оптимальными конструктивными характеристиками поверхности теплообмена, полученными в результате решения оптимизационных задач для различных критериев эффективности.

В работе рассматривались два вида панельных теплоутилизаторов: водотрубный, который используется в схемах для нагрева воды систем теплоснабжения, и воздухотрубный, используемый в схемах для нагрева дутьевого воздуха, поступающего в регенератор печи (рис.1, 2). Теплообменная часть каждого модуля теплоутилизатора набирается из секций в виде панелей с коллекторами, образованных с помощью труб, соединенных мембранами. При компоновке панелей в теплоутилизаторах используется шахматное и коридорное расположение труб. Греющим теплоносителем в теплоутилизаторах являются дымовые газы, которые омывают наружную поверхность панелей. Нагреваемым теплоносителем в водогрейных теплоутилизаторах служит вода, в воздухогрейных — воздух. Движение нагреваемого теплоносителя осуществля-

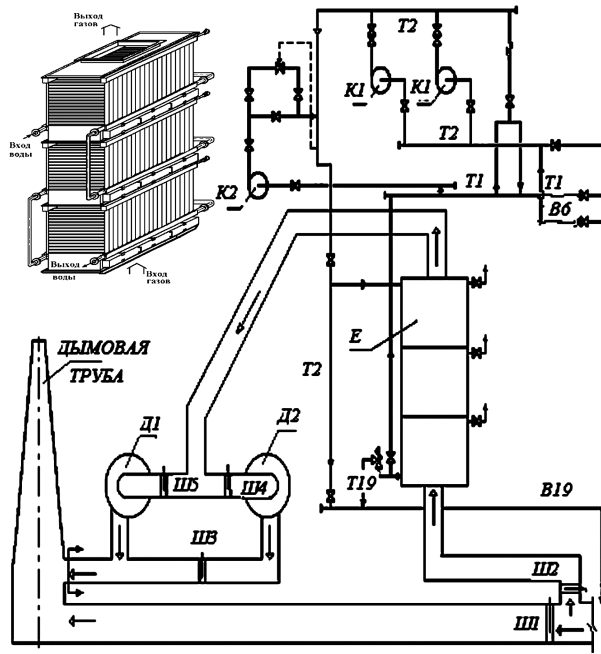


Рис.1. Схема теплоутилизационной установки с модульным водогрейным теплоутилизатором, предназначенная для нагрева воды системы отопления за счет использования теплоты отходящих газов стекловаренных печей: Е – теплоутилизатор; К – насосы; Т1, Т2 – прямой и обратный трубопроводы тепловой сети; Т19 – дренажный трубопровод; Д1, Д2 – дымососы; Ш – шиберы; В6 – трубопровод подпиточный; В19 – трубопровод для опорожнения теплоутилизатора.

ется в трубах теплоутилизационного устройства. Схема движения теплоносителей – перекрестно-точная с однокходовым движением газов и многоходовым движением нагреваемого теплоносителя при общем противоточном направлении потоков теплоносителей. Водотрубный теплоутилизатор состоит из трех, а воздушотрубный из двух модулей, расположенных вертикально в ряд и соединенных между собой.

Для расчета величины потерь эксергетической мощности  $E_{пот}$ , значение которой входит в тепло-эксергетический и эксерго-технологический критерии эффективности, использовались уравнения эксергетического баланса и соотношения для изменений эксергетической мощности дымовых газов и воды при прохождении через теплоутилизатор. Для водотрубного теплоутилизатора при расчете изменения эксергетической мощности дымовых газов использовались аналитические зависимости, полученные с учетом уравнения состояния идеального газа, поскольку в области изменения рабочих параметров дымовые газы с достаточной степенью точности можно считать идеальным газом. Величина потерь эксергетической мощности  $E_{пот}$  для водотрубного теплоутилизатора будет выражаться так:

$$E_{пот} = G^{д.г} \left[ c_{рер}^{д.г} (T_{вх}^{д.г} - T_{вых}^{д.г}) - T_0 \left( c_{рер}^{д.г} \ln \frac{T_{вх}^{д.г}}{T_{вых}^{д.г}} - \frac{R}{\mu^{д.г}} \ln \frac{p_{вх}^{д.г}}{p_{вых}^{д.г}} \right) \right] - G^{вод} \left[ (i_{вых}^{вод} - i_{вх}^{вод}) - T_0 (s_{вых}^{вод} - s_{вх}^{вод}) \right]. \quad (1)$$

В работе [6] решена оптимизационная задача и найдены оптимальные значения геометрических параметров поверхности теплообмена для воздушотрубного теплоутилизатора. При постановке оптимизационной задачи для водотрубного теплоутилизатора так же, как и для воздушотрубного теплоутилизатора, в качестве основных переменных (независимых факторов) выбраны определяющие конструктивные параметры поверхности теплообмена: расстояние  $s_1$  между панелями в направлении, поперечном направлению потока газов, расстояние  $s_2$  между трубами в панели в продольном направлении относительно потока газов и величина диаметра труб  $d$ . В качестве целевых функций оптимизации выбраны следующие критерии эффективности:

- эксерго-технологический критерий
- тепло-эксергетический критерий
- энергетический критерий Кирпичева

$$k = Q / N;$$

- технологический критерий

$$m_0 = m / Q.$$

Для решения оптимизационной задачи необходимо получить зависимости функций отклика (критериев эффективности), которые являются целевыми функциями оптимизации, от независимых факторов (конструктивных параметров). Для получения указанных функциональных зависимостей использовались статистические методы планирования эксперимента [7, 8]. Интервалы изменения параметров поверхности теплообмена (уровни варьирования

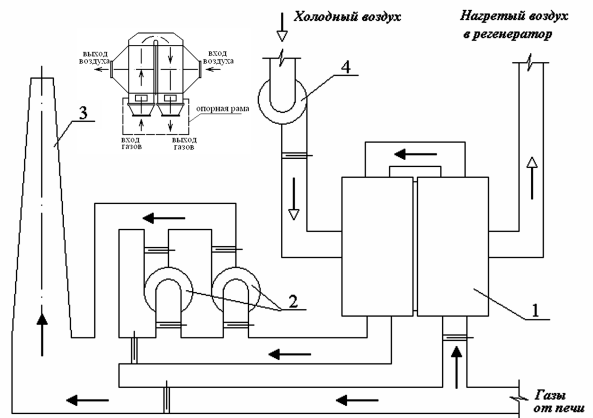


Рис.2. Схема теплоутилизационной установки с воздушотрубным теплоутилизатором, предназначенная для предварительного подогрева холодного воздуха перед поступлением его в регенератор печи: 1 – рекуператор; 2 – дымосос; 3 – дымоходная труба; 4 – вентилятор.

**Таблица 1. Условия проведения исследований**

Уровень варьирования	Фактор		
	s <sub>1</sub> , мм	s <sub>2</sub> , мм	d, мм
Верхний уровень, x <sub>1</sub> <sup>в</sup>	120	120	42
Нижний уровень, x <sub>1</sub> <sup>н</sup>	60	60	30
Основной уровень, нулевая точка, x <sub>10</sub>	90	90	36
Звездные точки, $\frac{x_1^в}{x_1^н}$	$\frac{126,5}{53,6}$	$\frac{126,5}{53,6}$	$\frac{43,3}{28,7}$
Интервал варьирования Δ <sub>i</sub>	30	30	6

факторов) для исследуемых теплоутилизаторов были одинаковыми и выбирались с учетом реальных требований к их эксплуатационным и конструктивным особенностям (табл.1).

Математическая модель каждого из исследуемых объектов с учетом гипотезы о незначимо-

сти тройного взаимодействия задавалась в виде квадратичной функции (уравнения регрессии):

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i,k=1}^n a_{ik} x_i x_k + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2. \quad (3)$$

Для каждого из исследуемых объектов строилась матрица планирования эксперимента, при построении которой использовался ортогональный центральный композиционный план. Критерием оптимальности плана является ортогональность столбцов матрицы планирования, что достигалось за счет специальным образом выбранного звездного плеча, величина которого используется для преобразования квадратичных факторов и свободного члена уравнения регрессии. В табл.2 представлена объединенная матрица планирования эксперимента для водотрубного теплоутилизатора.

**Таблица 2. Объединенная матрица планирования эксперимента для водотрубного теплоутилизатора**

№ <sub>п</sub> /№ <sub>п</sub>	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> <sup>*</sup>	X <sub>2</sub> <sup>*</sup>	X <sub>3</sub> <sup>*</sup>	Функции отклика y <sub>и</sub>			
								kT <sub>ex</sub>	ε	k	m <sub>0</sub>
1	1	-1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	0,637/0,706	0,334/0,339	166,8/84,1	1,92/2,08
2	1	1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	0,733/0,837	0,330/0,343	170,4/70,9	2,22/2,44
3	1	-1	1	-1	0,27	0,27	0,27	1,280/0,902	0,366/0,358	132,8/72,5	3,5/2,52
4	1	1	1	-1	0,27	0,27	0,27	1,300/0,926	0,360/0,348	153,3/81,6	3,6/2,66
5	1	-1	-1	1	0,27	0,27	0,27	0,570/0,615	0,310/0,315	283,0/253,1	1,8/1,95
6	1	1	-1	1	0,27	0,27	0,27	0,658/0,713	0,312/0,314	290,1/107,5	2,1/2,27
7	1	-1	1	1	0,27	0,27	0,27	1,200/0,753	0,361/0,330	365,2/348,8	3,3/2,28
8	1	1	1	1	0,27	0,27	0,27	1,187/0,782	0,350/0,322	425,6/319,0	3,3/2,43
9	1	-1,215	0	0	0,75	-0,73	-0,73	0,900/0,748	0,347/0,342	251,0/200,3	2,5/2,19
10	1	1,215	0	0	0,75	-0,73	-0,73	0,971/0,820	0,342/0,331	284,3/174,1	2,8/2,48
11	1	0	-1,215	0	-0,73	0,75	-0,73	0,579/0,687	0,311/0,326	225,3/123,9	1,8/2,11
12	1	0	1,215	0	-0,73	0,75	-0,73	1,266/0,818	0,359/0,336	260,4/200,3	3,5/2,43
13	1	0	0	-1,215	-0,73	-0,73	0,75	0,961/0,823	0,352/0,346	145,1/65,3	2,73/2,38
14	1	0	0	1,215	-0,73	-0,73	0,75	0,861/0,679	0,336/0,313	412,9/330,5	2,56/2,17
15	1	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	0,907/0,747	0,344/0,331	278,8/198,3	2,64/2,26

Примечание. В числителе – шахматный пучок, в знаменателе – коридорный пучок.

**Таблица 3. Коэффициенты уравнений регрессии в кодовых переменных для водотрубного теплоутилизатора**

	Шахматный пучок				Коридорный пучок			
	kT <sub>ex</sub>	ε	k	m <sub>0</sub>	kT <sub>ex</sub>	ε	k	m <sub>0</sub>
b <sub>0</sub>	8,99 · 10 <sup>-1</sup>	3,41 · 10 <sup>-1</sup>	2,77 · 10 <sup>-2</sup>	2,62	7,43 · 10 <sup>-1</sup>	3,29 · 10 <sup>-1</sup>	1,96 · 10 <sup>2</sup>	2,25
b <sub>1</sub>	2,53 · 10 <sup>-2</sup>	-2,29 · 10 <sup>-3</sup>	1,21 · 10 <sup>1</sup>	9,62 · 10 <sup>-2</sup>	3,37 · 10 <sup>-2</sup>	-2,59 · 10 <sup>-3</sup>	-1,93 · 10 <sup>1</sup>	1,21 · 10 <sup>-1</sup>
b <sub>2</sub>	2,93 · 10 <sup>-1</sup>	1,91 · 10 <sup>-2</sup>	1,91 · 10 <sup>1</sup>	7,08 · 10 <sup>-1</sup>	5,95 · 10 <sup>-2</sup>	5,40 · 10 <sup>-3</sup>	3,64 · 10 <sup>1</sup>	1,40 · 10 <sup>-1</sup>
b <sub>3</sub>	-4,17 · 10 <sup>-2</sup>	-6,98 · 10 <sup>-3</sup>	9,73 · 10 <sup>1</sup>	-7,27 · 10 <sup>-2</sup>	-6,24 · 10 <sup>-2</sup>	-1,34 · 10 <sup>-2</sup>	9,51 · 10 <sup>1</sup>	-9,36 · 10 <sup>-2</sup>
b <sub>12</sub>	-2,21 · 10 <sup>-2</sup>	-1,88 · 10 <sup>-3</sup>	8,78 · 10 <sup>0</sup>	-4,88 · 10 <sup>-2</sup>	-2,20 · 10 <sup>-2</sup>	-2,63 · 10 <sup>-3</sup>	1,73 · 10 <sup>1</sup>	-4,88 · 10 <sup>-2</sup>
b <sub>13</sub>	-5,12 · 10 <sup>-3</sup>	1,25 · 10 <sup>-4</sup>	5,43 · 10 <sup>0</sup>	-8,75 · 10 <sup>-3</sup>	-3,48 · 10 <sup>-3</sup>	-3,80 · 10 <sup>-4</sup>	-2,14 · 10 <sup>1</sup>	-3,75 · 10 <sup>-3</sup>
b <sub>23</sub>	-6,37 · 10 <sup>-3</sup>	3,38 · 10 <sup>-3</sup>	3,36 · 10 <sup>1</sup>	-2,63 · 10 <sup>-2</sup>	-9,77 · 10 <sup>-3</sup>	-1,20 · 10 <sup>-4</sup>	3,85 · 10 <sup>1</sup>	-2,13 · 10 <sup>-2</sup>
b <sub>11</sub>	2,44 · 10 <sup>-2</sup>	2,17 · 10 <sup>-3</sup>	-6,27 · 10 <sup>0</sup>	6,05 · 10 <sup>-2</sup>	2,78 · 10 <sup>-2</sup>	4,44 · 10 <sup>-3</sup>	-6,50 · 10 <sup>0</sup>	5,65 · 10 <sup>-2</sup>
b <sub>22</sub>	1,56 · 10 <sup>-2</sup>	-4,26 · 10 <sup>-3</sup>	-2,31 · 10 <sup>1</sup>	4,70 · 10 <sup>-2</sup>	5,85 · 10 <sup>-3</sup>	7,18 · 10 <sup>-4</sup>	-2,35 · 10 <sup>1</sup>	1,25 · 10 <sup>-2</sup>
b <sub>33</sub>	7,84 · 10 <sup>-3</sup>	1,83 · 10 <sup>-3</sup>	1,41 · 10 <sup>0</sup>	1,31 · 10 <sup>-2</sup>	4,83 · 10 <sup>-3</sup>	-3,00 · 10 <sup>-4</sup>	7,41 · 10 <sup>-1</sup>	1,59 · 10 <sup>-2</sup>

**Таблица 4. Оптимальные конструктивные параметры теплоутилизаторов**

Оптимальный параметр	Панельный теплоутилизатор	
	Водотрубный	Воздухотрубный
По критерию $kT_{ex}$		
$s_1$ , мм	60,0/60,0	60,0/60,0
$s_2$ , мм	72,9/61,2	60,0/60,0
$d$ , мм	38,3/42,0	30,0/30,0
$kT_{ex\text{ опт}}$ , кг/кВт	0,501/0,616	1,21/1,27
По критерию $\varepsilon$		
$s_1$ , мм	60,0/60,0	60,0/60,0
$s_2$ , мм	92,0/91,2	120,0/120,0
$d$ , мм	42,0/42,0	30,0/30,0
$\varepsilon_{\text{опт}}$	0,309/0,321	0,332/0,335
По критерию $k$		
$s_1$ , мм	120,0/120,0	120,0/120,0
$s_2$ , мм	120,0/120,0	120,0/120,0
$d$ , мм	42,0/42,0	42,0/42,0
$k_{\text{опт}}$	425,2/314,2	74,9/70,9
По критерию $m_0$		
$s_1$ , мм	60,0/60,0	60,0/60,0
$s_2$ , мм	67,3/60,0	60,0/60,0
$d$ , мм	42,0/42,0	30,0/30,0
$m_{0\text{ опт}}$ , кг/кВт	1,89/1,95	3,56/3,69

*Примечание.* В числителе – шахматный пучок, в знаменателе – коридорный пучок.

В соответствии с матрицей планирования рассчитывались коэффициенты для уравнений регрессии в кодовых переменных по следующим формулам:

$$b_0 = \frac{1}{r} \left( \sum_{u=1}^r X_0 Y_u - \sum_{u=1}^r \sum_{i=1}^n b_{ii} X_{ui}^2 \right);$$

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

В каждой серии испытаний осуществлялась рандомизация порядка проведения опытов. Оценка однородности дисперсий на каждом уровне факторов проводилась по критерию Кохрена, проверка значимости коэффициентов уравнений регрессии – по критерию Стьюдента, проверка адекватности полученных уравнений использованным данным – по критерию Фишера.

В табл.3 приведены результаты расчета коэффициентов уравнений регрессии в кодовых переменных для водотрубного теплоутилизатора. Переход в полученных уравнениях регрессии от кодовых переменных к физическим осуществлялся в соответствии с формулой:

$$X_i = (x_i - x_{i0}) / \delta_i.$$

В результате проведенных расчетов получены функциональные зависимости рассматриваемых критериев эффективности от конструктивных параметров поверхности теплообмена для водотрубного теплоутилизатора при шахматном и коридорном расположении труб в пучке.

На рис.3 приведены некоторые наиболее характерные из полученных зависимостей. Для каждой из полученных функций решалась оптимизационная задача и определялись оптимальные значения геометрических параметров поверхности теплообмена. Для энергетического критерия Кирпичова определялся максимум функции, для технологического, тепло-эксергетического и эксерго-технологического критериев – минимум (табл.4).

В работе [6] в качестве основных показателей, определяющих возможность использования тех или иных критериев для оценки эффективности теплоутилизаторов, принята чувствительность критериев к изменению характеристик теплоутилизатора. В указанной работе на примере воздухотрубного теплоутилизатора установлена степень влияния на критерии эффективности различных теплотехнических и конструктивных параметров и на этой основе определены критерии, наиболее чувствительные к их изменению.

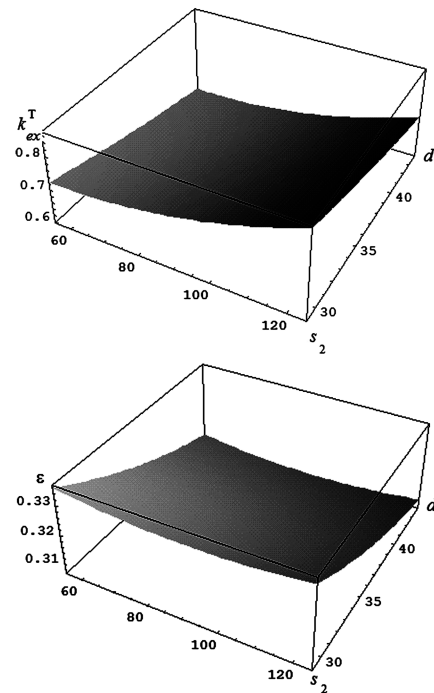


Рис.3. Зависимость критериев эффективности от расстояния между трубами в панели и диаметра трубы для водотрубного теплоутилизатора.

В данной работе проведены аналогичные оценки для водотрубного теплоутилизатора и изложены данные по сравнительному анализу эффективности водотрубного и воздухоотрубного теплоутилизаторов с полученными оптимальными конструктивными характеристиками теплообменной поверхности, а также с учетом дополнительных технологических факторов определена целесообразность использования той или иной теплоутилизационной схемы в теплоутилизационных технологиях различных газопотребляющих энергетических установок.

Наиболее чувствительными к изменению параметра  $s_1$  являются энергетический критерий  $k$  и эксерго-технологический критерий  $k^{T_{ex}}$ . В пределах заданного интервала изменения  $s_1$  энергетический критерий изменяется для шахматного пучка примерно в 1,4 раза, для коридорного — в 2,4 раза, эксерго-технологический критерий для шахматного пучка — в 2 раза, для коридорного — в 1,2 раза. Степень чувствительности всех рассмотренных критериев эффективности к изменению величины расстояния  $s_2$  между трубами в панели в направлении, совпадающем с направлением движения дымовых газов, примерно одинакова. В пределах заданного интервала изменения  $s_2$  все рассмотренные критерии эффективности изменяются, в среднем, на 12 %.

Наиболее чувствительным к изменению величины диаметра труб  $d$  являются энергетический критерий  $k$ , который с увеличением  $d$  в пределах заданного интервала увеличивается, в среднем, в 3,2 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. Оптимальные значения диаметра труб для указанного критерия совпадают с верхней границей интервала изменения  $d$ .

Наиболее чувствительными к изменению способа компоновки труб в пучке являются энергетический критерий  $k$  и эксерго-технологический критерий  $k^{T_{ex}}$ . Значения этих критериев свидетельствуют о более высокой эффективности теплоутилизаторов с шахматной компоновкой труб в пучке по сравнению с коридорной.

Таким образом, степень чувствительности исследуемых критериев эффективности к изменению параметров поверхности теплообмена теплоутилизаторов в целом различна, наиболее чувствительными к изменению конструктивных параметров являются энергетический критерий Кирпичева  $k$  и эксерго-технологический критерий  $k^{T_{ex}}$ .

Для стекловаренных печей благодаря более высокой эффективности, а также компактности водогрейных утилизаторов по сравнению с воздухогрейными (энергетический критерий Кирпичева показывает увеличение эффективности в среднем в 5 раз, эксерго-технологический критерий — в 2 раза, технологический — в 1,9 раза, тепло-эксерго-технологический — на 7,5 %), в условиях стабильной значительной потребности в горячей воде для внедрения могут быть рекомендованы теплоутилизационные схемы для нагрева воды систем теплоснабжения. При применении таких схем утилизированная теплота используется в системе теплоснабжения предприятия (или других объектов), повышая коэффициент использования теплоты топлива печи на 15–25 %. Из-за более низкой эффективности воздухогрейных теплоутилизаторов их применение в схемах утилизации теплоты дымовых газов стекловаренных печей до недавнего времени считалось нецелесообразным.

Однако следует отметить, что выбор схемы использования утилизированной теплоты определяется, наряду с перечисленными показателями эффективности, и другими факторами. Основными из них являются потребность в определенном виде теплоносителя (горячей воде для систем отопления и горячего водоснабжения, нагретом воздухе, поступающем на горение в соответствующий тепловой агрегат), стоимость топлива, возможность использования эффективных поверхностей нагрева и др. Так, ограниченность в потреблении горячей воды, периодичность ее использования в системах отопления, а также постоянная тенденция к увеличению стоимости топлива, с одной стороны, и совершенствование технологии производства эффективных поверхностей нагрева (с оребрением, гофрированных, с интенсификаторами теплообмена и т.д.) для воздухонагревателей, с другой, определила возможность конкуренции последних в теплоутилизационных технологиях различных газопотребляющих энергетических установок.

К достоинствам теплоутилизационных схем для нагрева воздуха, идущего на горение, следует отнести также большее, по сравнению со схемами для нагрева воды, число часов работы теплоутилизационного оборудования на протяжении года. Так, при использовании воздухоподогревателей для стекловаренных печей, работающих непрерывно, число часов работы воздухоподогревателей практически соответствует кампании печи (3–6 лет). Кроме того, тепловая нагрузка теплоутилизаторов в схемах для подгрева воздуха, идущего на горение, определяется достаточно стабильной загрузкой теплового агрегата, а не зависит от периодичности использования горячей воды в системах отопления. В свя-

зи с вышесказанным, в условиях нестабильности в потреблении горячей воды и периодичности ее использования в системах отопления для внедрения могут быть рекомендованы теплоутилизационные схемы для подогрева воздуха, поступающего на горение, использующие воздухогрейные утилизаторы теплоты. При применении таких схем утилизируемая теплота расходуется в основном тепловом агрегате при пониженном расходе топлива за счет предварительного подогрева воздуха. При этом коэффициент полезного действия печи повышается на 10–15 %.

### Условные обозначения

$a_{ik}$	– коэффициенты уравнения регрессии в физических переменных
$b_{ik}$	– коэффициенты уравнения регрессии в кодовых переменных
$c_p$	– удельная изобарная теплоемкость
$d$	– диаметр трубы
$E$	– эксергетическая мощность
$G$	– массовый расход теплоносителя
$i$	– энтальпия
$k$	– энергетический критерий Кирпичова
$k_{T_{ex}}$	– эксерго-технологический критерий
$m$	– масса
$m_0$	– удельная материалоемкость
$N$	– мощность, затрачиваемая на прокачку теплоносителей
$n$	– число независимых параметров
$p$	– давление
$Q$	– тепловая мощность
$r$	– число точек плана
$R$	– газовая постоянная
$s$	– энтропия
$s_1$	– расстояние между панелями или трубами пучка в направлении, поперечном потоку газов
$s_2$	– расстояние между трубами в панели или пучке в продольном направлении
$T$	– температура
$T_0$	– температура окружающей среды
$X_i$	– кодовая переменная
$x_i$	– физическая переменная
$Y_u$	– функция отклика
$\Delta$	– изменение величины
$\varepsilon$	– тепло-эксергетический критерий
$\mu$	– молекулярная масса

*Индексы верхние:* дг – дымовые газы; вод – вода.

*Индексы нижние:* вх, вых – входной, выходной параметр; опт – оптимальное значение величины; пот – потери; ср – среднее значение величины; ex – эксергетический.

### Выводы

На примере водотрубного и воздухотрубного теплоутилизаторов стекловаренной печи показано, что степень чувствительности различных критериев эффективности, а также возможность при их использовании в качестве целевых функций оптимизации получать опти-

мальные значения конструктивных параметров теплообменной поверхности, находящиеся внутри заданного интервала, зависит от параметров поверхности теплообмена, способа компоновки труб в пучке, типа теплоутилизатора, что влечет за собой необходимость в каждом конкретном случае использовать для оценки эффективности определенный критерий.

Установлено, что эксерго-технологический и энергетический критерии являются наиболее чувствительными к изменению характеристик теплоутилизационных систем, а тепло-эксергетический критерий эффективности целесообразно использовать в качестве целевых функций оптимизации, позволяющих получать оптимальные значения конструктивных параметров, находящиеся внутри исследуемого интервала.

Комплексный анализ эффективности теплоутилизаторов стекловаренной печи с учетом дополнительных технологических факторов позволил установить целесообразность использования той или иной теплоутилизационной схемы в теплоутилизационных технологиях различных газопотребляющих энергетических установок.

### Список литературы

1. Долинский А.А. К вопросу эксергоэкономической оптимизации энергетических систем // Пром. теплотехника. – 2009. – Т. 31. – № 4. – С. 105–108.
2. Амерханов Р.А., Долинский А.А., Драганов Б.Х. Основы эксергоэкономического метода оптимизации энергопреобразующих систем // Там же. – 2010. – Т. 32, № 1. – С. 90–101.
3. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И. и др. Эффективность систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок различного типа // Там же. – 2008. – Т. 30, № 3. – С. 68–76.
4. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И. и др. Комплексный подход к оценке эффективности систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2008. – № 5. – С. 22–28.
5. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И. и др. Эффективность систем утилизации теплоты отходящих газов стекловаренных печей // Пром. теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 4. – С. 78–85.
6. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И. и др. Сравнительный анализ эффективности теплоутилизационного оборудования стекловаренных печей на основе использования различных критериев эффективности // Там же. – 2010. – Т. 32, № 2. – С. 42–50.
7. Налимов В.В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 207 с.
8. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента. – М.: Металлургия, 1981. – 151 с.

Поступила в редакцию 10.09.10

## **The Efficiency of Glass Furnaces Heat Utilizers of Different Types**

***Fialko N.M., Sherenkovsky Ju.V., Stepanova A.I.,  
Navrodska R.A., Sarioglo A.G., Shevchuk S.I.***

*The Institute of Technical Thermodynamics of NASU, Kiev*

The results of panel heat utilizers comparative efficiency analysis for glass furnaces such as water-tube and air-tube heat utilizers are presented. The utilizers efficiency data with optimal constructive heat-exchange surfaces characteristics are aduced. The constructive characteristics are obtained by optimizational problem for different efficiency criteria solving.

**Key words:** heat utilization, efficiency criteria estimation, heat utilizer.

Received September 10, 2010