

УДК 621.036.7

Фиалко Н.М.^{1,2}, Шеренковский Ю.В.¹, Степанова А.И.¹, Навродская Р.А.¹, Новаковский М.А.¹

¹ Институт технической теплофизики НАН Украины

² Национальный технический университет Украины «КПИ»

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОВОЗДУШНЫХ ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРОВ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Викладено результати аналізу термодинамічної ефективності і оптимізації теплоутилізаційної установки скловарної печі, яка містить панельний газоповітряний повітрогрійний теплоутилізатор мембранного типу. Наведено дані щодо оцінки ступеня впливу теплотехнічних і технологічних параметрів на ефективність теплоутилізаційної установки.

Изложены результаты анализа термодинамической эффективности и оптимизации теплоутилизационной установки стекловаренной печи, которая содержит панельный газоздушный воздухогрейный теплоутилизатор мембранного типа. Приведены данные по оценке степени влияния теплотехнических и технологических параметров на эффективность теплоутилизационной установки.

The results of analysis of efficiency and optimization of the heat-utilization installation of glass furnaces which contains a panel gas-air air-warm heat utilizer of membrane type are expounded. The influences warmly of technical and technological parameters given as evaluated by a degree are resulted on efficiency by heat-utilization installation.

b – толщина мембраны;
 C – суммарный водяной эквивалент;
 c_p – удельная изобарная теплоемкость;
 d_1 – внутренний диаметр трубы;
 d_2 – наружный диаметр трубы;
 E – эксергетическая мощность;
 F – поверхность теплообмена;
 $h_{\text{мем}}$ – высота мембраны;
 l – длина трубы;
 k – коэффициент турбулизации;
 m – масса;
 N – количество труб в теплоутилизаторе;
 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;
 s'_2 – диагональный шаг пучка;
 T – температура;
 T_0 – температура окружающей среды;
 w – скорость;
 z_2 – количество труб в одном поперечном ряду трубного пучка;

Pr – число Прандтля;
 Re – число Рейнольдса;
 α_k – конвективный коэффициент теплоотдачи;
 $\alpha_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент теплоотдачи;
 λ – теплопроводность;
 μ_m – молекулярная масса;
 μ – вязкость;
 ξ – коэффициент загрязнения;
 ρ – плотность;
 ψ – коэффициент пересчета от противоточной схемы к схеме с многократно перекрестным током.

Индексы верхние:

дг – дымовые газы;
 возд – воздух;
 внут – внутренний параметр;
 внеш – внешний параметр;
 нар – наружная поверхность.

Индексы нижние:

вх, вых – входной, выходной параметр;
 мем – мембрана;
 п – полная;
 пот – потери;
 тр – труба.

В последние годы, благодаря успешному развитию эксергетических методов исследова-

ния, многие задачи термодинамического характера, имеющие непосредственное отношение

к инженерной практике, могут быть решены на основе эксергетического подхода. В частности, это задачи, касающиеся оценки степени термодинамического совершенства энергетических установок, их термодинамической оптимизации и др. [1-3].

Целью данной работы является анализ термодинамической эффективности и оптимизация теплоутилизационной установки стекловаренной печи, предназначенной для предварительного нагрева воздуха, поступающего в регенераторы печи.

Схема указанной теплоутилизационной установки содержит панельный газоздушный воздухогрейный теплоутилизатор мембранного типа (поверхностный концевой рекуператор) (рис.1). Движение теплоносителей в рекуператоре является противоточным: воздух движется в трубах, газы – в межтрубном пространстве.

Анализ эффективности и оптимизация теплоутилизационной установки стекловаренной

печи проведены на основе разработанной методики, основные аспекты которой могут быть сформулированы следующим образом.

Предлагаются критерии оценки эффективности теплоутилизационной системы, которые позволяют оценить ее совершенство с термодинамической, теплотехнической и технологической позиций. В данной работе в качестве таких критериев могут быть использованы удельные эксергетические характеристики теплоутилизационной системы $\varepsilon = E_{\text{пот}}^{\text{внут}} / Q$ и $k_{\text{ex}}^T = E_{\text{пот}}^{\text{внут}} / m / Q^2$. Первый из критериев определяет внутренние потери эксергетической мощности на единицу снимаемой тепловой мощности, второй включает также удельную материалоемкость.

Составляются системы балансовых уравнений: эксергетических, тепловых и материальных. В интегральный баланс включаются все эксергетические, тепловые и материальные потоки, которые проходят через некоторую

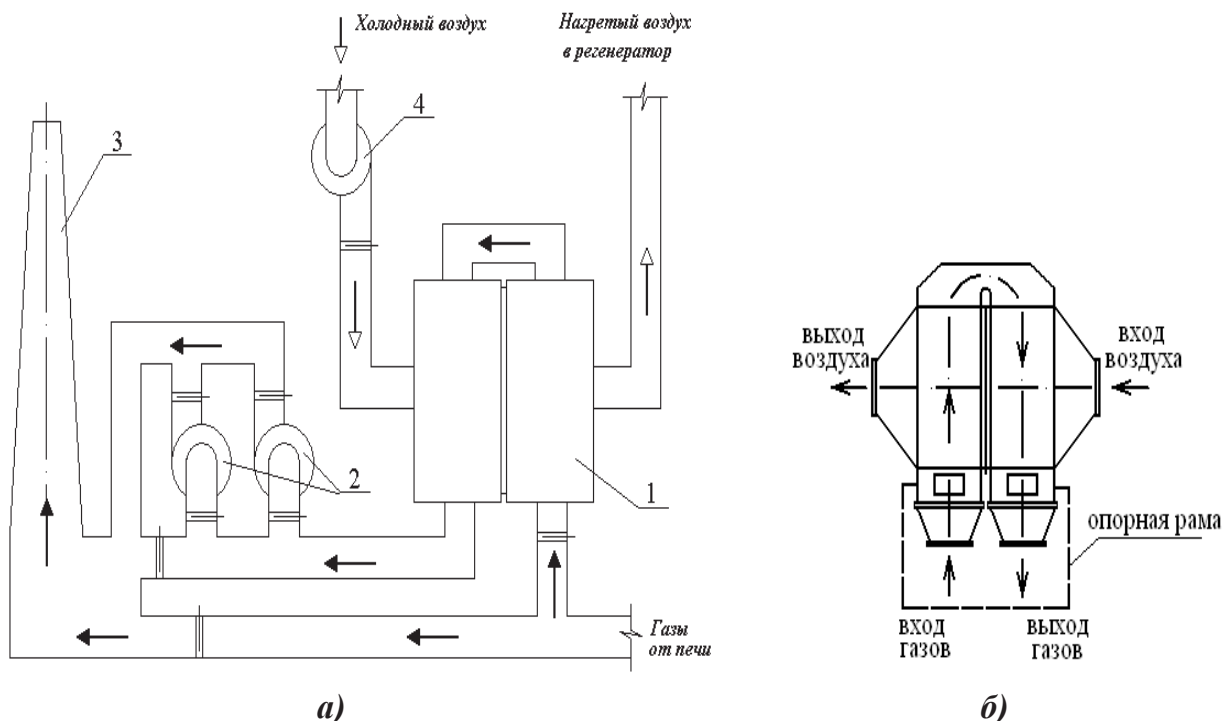


Рис. 1. Схема теплоутилизационной установки с концевым рекуператором, предназначенной для предварительного подогрева холодного воздуха перед поступлением его в регенератор печи: 1 – рекуператор; 2 – дымосос; 3 – дымовая труба; 4 – вентилятор; \rightarrow \rightarrow – направления потоков воздуха и дымовых газов; \equiv – газоход, воздухоход; \equiv – шибер; а) – принципиальная схема; б) – концевой рекуператор.

замкнутую контрольную поверхность теплоутилизационной системы.

В каждом конкретном случае система балансовых уравнений дополняется соответствующими уравнениями теплопередачи и соотношениями для эксергетических, гидродинамических, теплообменных и других характеристик.

Из системы уравнений определяются величины внутренних эксергетических потерь (деструкции), а также величины теплотехнических и технологических характеристик, которые входят в указанные критерии эффективности. Внутренние эксергетические потери теплоутилизационных систем включают потери, связанные с необратимостью теплообмена при конечной разности температур теплоносителей, а также эксергетические потери, связанные с потерей работы на преодоление гидравлических сопротивлений при прокачке теплоносителей.

На основе полученных характеристик рассчитываются критерии эффективности, в дальнейшем выступающие в качестве целевых функций оптимизации.

Проводится выбор метода оптимизации. Если для конкретной теплоутилизационной системы или для определенного типа систем можно установить функциональные зависимости полученных критериев эффективности от основных параметров, оптимизация проводится с помощью известных математических методов. Если указанные зависимости установить не представляется возможным, многофакторные задачи оптимизации решаются с помощью структурного, вариантного или структурно-вариантного методов, основанных на эксергетическом подходе.

Решается оптимизационная задача и определяются оптимальные величины параметров теплоутилизационной системы, а также соответствующие им критерии эффективности.

На основе полученных значений критериев эффективности проводится сравнительный анализ эффективности теплоутилизационных систем различной конструкции и различного назначения.

Полученные результаты используются при разработке эффективных теплоутилизационных схем.

В работах [4-6] при получении необходимых для решения оптимизационных задач функциональных зависимостей критериев эффективности от основных параметров теплоутилизационных систем использовались статистические методы планирования эксперимента, позволяющие получить указанные зависимости в виде квадратичных функций.

В работе [7] указанные зависимости были установлены для определенного типа теплоутилизаторов, а именно для панельных газоздушных воздухогрейных теплоутилизаторов мембранного типа в случае коридорной компоновки труб в пучке.

В работе [8] оптимизационные задачи решаются с помощью структурно-вариантного метода, позволяющего оптимизировать теплоутилизационную систему посредством оптимизации отдельных ее элементов.

В данной работе получены функциональные зависимости для теплоутилизаторов указанного типа, позволяющие использовать их для анализа эффективности теплоутилизаторов как с коридорной, так и с шахматной компоновкой труб в пучке. Соответствующие соотношения для критерия эффективности k_{ex}^T имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 k_{ex}^T = & \left\{ \ln \left(1 + \frac{T_{BX}^{дг} - T_{BX}^{в03}}{CT_{BX}^{в03} \left((1 + \xi \alpha_K^{дг}) / \alpha_{пг}^{дг} F_{пг} + 1 / \alpha_K^{в03} F_{гп}^{внут} \right)} \right) \right\} + \\
 & + \ln \left(1 - \frac{(T_{BX}^{дг} - T_{BX}^{в03}) \psi}{CT_{BX}^{в03} \left((1 + \xi \alpha_K^{дг}) / \alpha_{пг}^{дг} F_{пг} + 1 / \alpha_K^{в03} F_{гп}^{внут} \right)} \right) + \\
 & + \frac{Rl \rho^{в03} (w^{в03})^2}{2d_1 c_p^{в03} (1,82 \ln Re^{в03} - 1,64)^2 \mu_M^{в03} p_{BX}^{в03}} + \\
 & + D \frac{R \rho^{дг} (w^{дг})^2}{2\mu_M^{дг} p_{BX}^{дг} c_p^{дг}} \left\{ \frac{T_0 m C}{Q} \right\}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Для шахматного пучка:

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

$$\alpha_{\text{пр}}^{\text{др}} = \frac{0,127(s'_1/d_2)^{-0,7}(\text{Re}^{\text{др}})^{0,75}\lambda^{\text{др}}[H+1,1F_{\text{тр}}^{\text{нар}}(1-H)/F_{\text{п}}]}{d_2},$$

$$F_{\text{мем}} = \ln(4s_2 - 2d_2), F_{\text{п}} = \ln(4s_2 - 2d_2 + \pi d_2),$$

$$h_{\text{мем}} = 0,5(2s_2 - d_2).$$

Для коридорного пучка:

$$D = 0,074 \left(\frac{s_1/d_2 - 1}{s'_2/d_2 - 1} \right)^{-1,5} \cdot z_2,$$

$$\alpha_{\text{пр}}^{\text{др}} = \frac{0,051(\text{Re}^{\text{др}})^{0,75}\lambda^{\text{др}}[H+1,1F_{\text{тр}}^{\text{нар}}(1-H)/F_{\text{п}}]}{d_2},$$

$$F_{\text{мем}} = 2\ln(s_2 - d_2), F_{\text{п}} = 2\ln(s_2 - d_2 + 0,5\pi d_2),$$

$$h_{\text{мем}} = 0,5(s_2 - d_2).$$

Общие для шахматного и коридорного пучков параметры:

$$\alpha_{\text{к}}^{\text{воз}} = k \cdot 0,022(\text{Re}^{\text{воз}})^{0,8} \cdot (\text{Pr}^{\text{воз}})^{0,43} \cdot \lambda^{\text{воз}}/d_1,$$

$$H = \text{th}(fh_{\text{мем}})/ph_{\text{мем}}, f = \sqrt{\frac{2\alpha_{\text{к}}^{\text{др}} v_{\text{мем}}}{\lambda_{\text{мем}} b(1 + \xi\alpha_{\text{к}}^{\text{др}})}},$$

$$v_{\text{мем}} = \frac{F_{\text{п}}}{F_{\text{мем}}} \left(1 - v_{\text{тр}} \frac{F_{\text{тр}}^{\text{нар}}}{F_{\text{мем}}} \right),$$

$$F_{\text{тр}}^{\text{внут}} = \ln\pi d_1, F_{\text{тр}}^{\text{нар}} = \ln\pi d_2,$$

$$w^{\text{др}} = (\text{Re}^{\text{др}} \mu^{\text{др}})/(\rho^{\text{др}} d_2), w^{\text{воз}} = (\text{Re}^{\text{воз}} \mu^{\text{воз}})/(\rho^{\text{воз}} d_1),$$

$$Q = \psi(T_{\text{вх}}^{\text{др}} - T_{\text{вх}}^{\text{воз}})/[(1 + \xi\alpha_{\text{к}}^{\text{др}})/(\alpha_{\text{пр}}^{\text{др}} F_{\text{п}}) + 1/(\alpha_{\text{к}}^{\text{воз}} F_{\text{тр}}^{\text{внут}})].$$

Минимизация полученной зависимости (1), а также аналогичной зависимости для критерия эффективности ε позволяет получить области оптимальных значений параметров теплоутилизаторов, которые могут быть использованы при разработке эффективных схемных решений теплоутилизационных систем.

В работе [7] проанализировано влияние на эффективность панельных газоздушных воздухогрейных теплоутилизаторов мембранного типа коэффициента загрязнения ξ теплообменной поверхности теплоутилизатора дымовыми газами стекловаренной печи и установлена область его значений, в пределах которой не происходит резкого уменьшения эффектив-

ности теплоутилизатора вследствие загрязнения его поверхности.

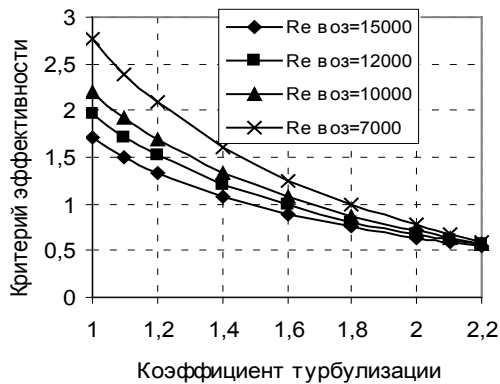
В данной работе приведены результаты исследования эффективности указанных теплоутилизаторов в зависимости от способа компоновки труб в пучке при различных значениях следующих параметров теплоутилизатора:

- степени турбулизации воздушного потока вследствие наличия кольцевой накатки на поверхности труб;
- входных параметров теплоносителей;
- отношения чисел Рейнольдса теплоносителей;
- геометрических параметров теплообменной поверхности.

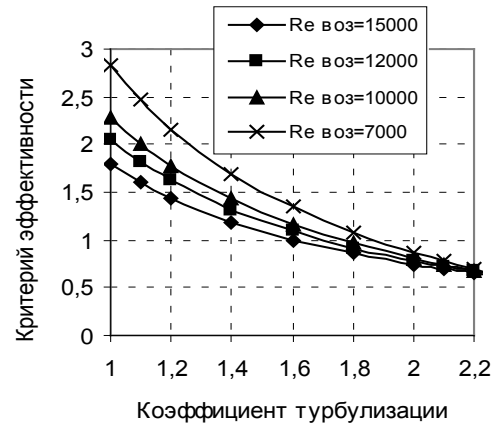
Степень турбулизации воздушного потока характеризовалась коэффициентом турбулизации k , представляющим собой отношение коэффициентов теплоотдачи труб с кольцевой накаткой и соответствующих гладких труб. Проведенный анализ позволил установить следующее. Как видно из рис. 2, зависимости критерия эффективности k_{ex}^{T} от коэффициента турбулизации k для случаев шахматной и коридорной компоновок труб в пучке имеют практически одинаковый характер (эффективность теплоутилизаторов возрастает при увеличении коэффициента турбулизации для всех используемых значений чисел $\text{Re}^{\text{воз}}$).

Для гладких труб ($k = 1$) переход от шахматной компоновки труб в пучке к коридорной практически не сказывается на эффективности теплоутилизатора (критерий эффективности k_{ex}^{T} увеличивается, в среднем, на 4,2 %). По мере увеличения коэффициента турбулизации этот переход приводит к более значительному понижению эффективности (при $k = 2$ критерий эффективности k_{ex}^{T} увеличивается, в среднем, на 17,1 %). Данное утверждение справедливо для всех рассматриваемых значений чисел $\text{Re}^{\text{воз}}$. Степень влияния $\text{Re}^{\text{воз}}$ на эффективность теплоутилизаторов уменьшается с увеличением коэффициента турбулизации как для шахматной, так и для коридорной компоновки труб в пучке.

Для всех полученных зависимостей критерия эффективности k_{ex}^{T} от входной температуры дымовых газов $T_{\text{вх}}^{\text{др}}$ при значениях $T_{\text{вх}}^{\text{др}} \approx 950$ К наблюдается минимум k_{ex}^{T} , что соответствует



а)



б)

Рис. 2. Зависимость критерия эффективности k_{ex}^T от коэффициента турбулизации k : $\xi = 0$; $Re^{дг} = 15000$; $\psi \approx 0,995$: а) шахматный пучок, б) коридорный пучок.

максимальной эффективности теплоутилизатора при этой температуре воздуха (рис. 3). Переход от коридорного к шахматному пучку при различных значениях входной температуры воздуха $T_{вх}^{в03}$, а также повышение входной температуры воздуха в рамках определенной компоновки пучка приводят к повышению эффективности теплоутилизатора (в соответствии со снижением критерия эффективности k_{ex}^T).

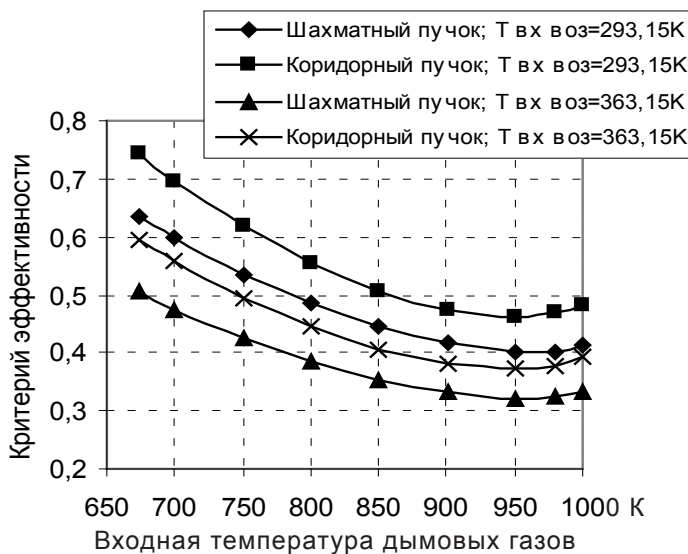


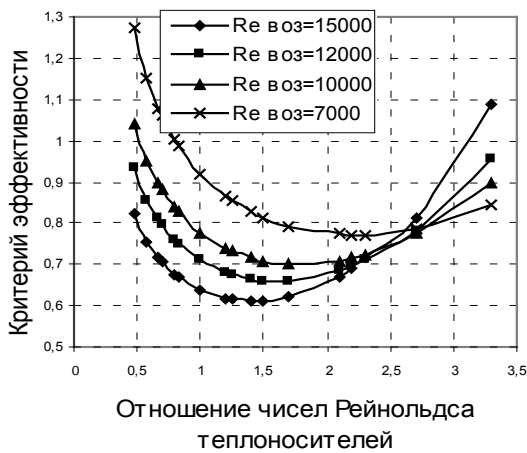
Рис. 3. Зависимость критерия эффективности k_{ex}^T от входной температуры дымовых газов $T_{вх}^{дг}$: $Re^{дг} = 15000$; $Re^{в03} = 15000$; $k = 2,0$; $\xi = 0$; $\psi \approx 0,995$.

В области значений входной температуры дымовых газов $T_{вх}^{дг} \approx 673,15 \dots 823,15$ К и входной температуры воздуха $T_{вх}^{в03} \approx 293,15 \dots 343,15$ К уменьшение значений критерия эффективности k_{ex}^T при увеличении $T_{вх}^{дг}$ происходит по линейному закону. Повышение входной температуры любого из теплоносителей на некоторую величину приводит к одинаковому увеличению эффективности теплоутилизатора.

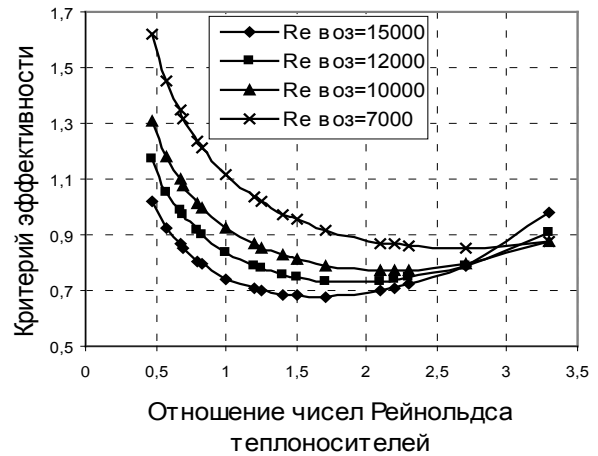
Как видно из рис. 4, для всех полученных зависимостей эффективности k_{ex}^T от отношения чисел Рейнольдса теплоносителей $Re^{дг}/Re^{в03}$ при шахматной и коридорной компоновке труб в пучке наблюдается минимум k_{ex}^T , который при увеличении числа $Re^{в03}$ смещается в сторону меньших значений отношения чисел Рейнольдса.

При увеличении значений чисел Рейнольдса теплоносителей различие в эффективности теплоутилизаторов с шахматным и коридорным расположением труб в пучке уменьшается. Так, при $Re^{в03} = 7000$ и $Re^{дг} = 7000$ значение k_{ex}^T для коридорного пучка на 21,0 % выше, чем для шахматного пучка, а при $Re^{в03} = 25000$ и $Re^{дг} = 25000$ – на 13,9 %.

Что касается влияния на эффективность теплоутилизатора геометрических параметров теплообменной поверхности, то в заданном интервале значений расстояния между панелями s_1 наименьшее значение критерия k_{ex}^T



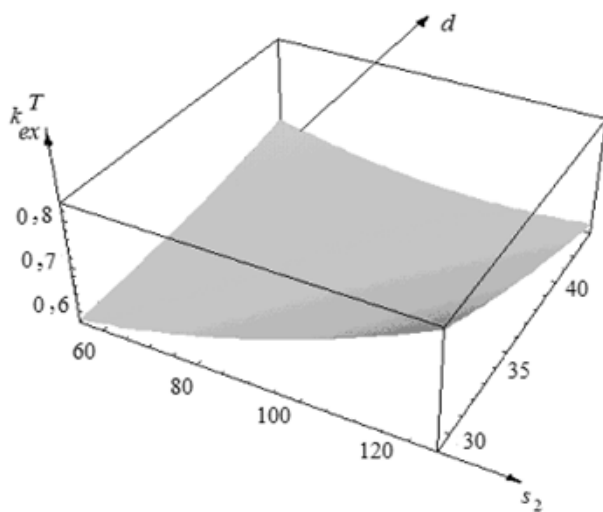
а)



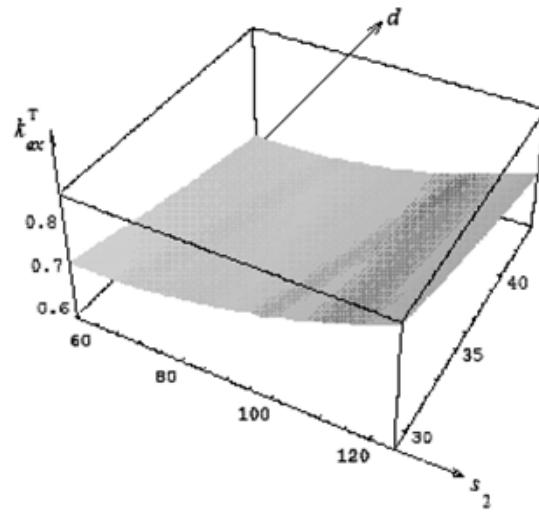
б)

Рис. 4. Зависимость критерия эффективности k_{ex}^T от отношения чисел Рейнольдса Re^{dr}/Re^{voz} при коридорном расположении труб в пучке: $k = 2,0$; $\xi = 0$; $\psi \approx 0,995$.

а) шахматный пучок, б) коридорный пучок.



а)



б)

Рис. 5. Зависимость критерия эффективности k_{ex}^T от геометрических параметров теплообменной поверхности при $s_1 = 60$ мм: а) шахматный пучок, б) коридорный пучок.

достигается на нижней границе данного интервала. При изменении величины продольного расстояния между трубами s_2 и диаметра трубы d в пределах рассматриваемых интервалов наблюдается минимум критерия эффективности (рис. 5).

Использование в качестве целевых функций оптимизации критериев эффективности

k_{ex}^T и ϵ позволило получить области оптимальных значений основных параметров теплоутилизатора (табл. 1).

Полученные результаты использованы при разработке эффективных теплоутилизационных схем с панельными газоздушными воздухогрейными теплоутилизаторами мембранного типа.

Табл. 1. Области оптимальных значений параметров панельных газоздушных воздухогрейных теплоутилизаторов мембранного типа

| Параметр | Обозначение параметра | Область оптимальных значений |
|-----------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Коэффициент загрязнения | β | 0...0,012 |
| Коэффициент турбулизации | k | 1,9...2,2 |
| Входная температура дымовых газов | $t^{дг}, ^\circ\text{C}$ | 660...700 |
| Входная температура воздуха | $t^{воз}, ^\circ\text{C}$ | 20...50 |
| Отношение чисел Рейнольдса | $Re^{дг}/Re^{воз}$ | 1,4...2,7 |
| Расстояние между панелями | $s_1, \text{мм}$ | 60...65 |
| Расстояние между трубами в панели | $s_2, \text{мм}$ | 60...65 |
| Наружный диаметр трубы | $d_2, \text{мм}$ | 30...35 |

Выводы

1. Проведен анализ термодинамической эффективности и оптимизация теплоутилизационной установки стекловаренной печи, которая содержит панельный газоздушный воздухогрейный теплоутилизатор мембранного типа.

2. Для проведения указанного анализа использована разработанная на основе эксергетического подхода методика комплексного анализа эффективности и термодинамической оптимизации теплоутилизационных систем.

3. Для данного типа теплоутилизаторов с шахматной и коридорной компоновкой труб в пучке получены функциональные зависимости предложенных критериев эффективности от параметров теплоутилизаторов.

4. С помощью полученной зависимости определены характер и степень влияния на эффективность теплоутилизационной установки способа компоновки труб в пучке при различных значениях следующих параметров:

- степени турбулизации воздушного потока;
- входных параметров теплоносителей;
- отношения чисел Рейнольдса теплоносителей;
- геометрических параметров теплообменной поверхности.

5. Установлены области оптимальных зна-

чений параметров теплоутилизаторов, которые могут быть использованы при разработке эффективных теплоутилизационных схем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долинский А.А., Драганов Б.Х., Шморгунов В.В. Энтропийно-эксергетический анализ теплоэнергетических систем // Промышленная теплотехника. – 2011. – Т. 33, №2. – С. 78 – 85.
2. Тсатсаронис Д. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации энергосберегающей системы – Одесса: Студия «Негоциант». – 2002. – 152 с.
3. *Эксергетический метод* и его приложения. Под ред. В.М. Бродянского – М.: Издательство «Мир». – 1967. – 247с.
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 // Экотехнологии 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 // Пром. теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 4. – С. 78 – 85.

6. *Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Навродская Р.А., Шевчук С.И., Новаковский М.А.* Сравнительный анализ эффективности теплоутилизационного оборудования стекловаренных печей на основе использования различных критериев эффективности // Пром. теплотехника. – 2010. – Т. 32, № 2. – С. 42 – 50.

7. *Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Навродская Р.А., Новаковский М.А.* Эксерго-технологическая

эффективность газоздушных теплоутилизаторов энергетических установок // Пром. теплотехника. – 2011. – Т. 33, №3. – С.42 – 49.

8. *Фиалко Н.М., Степанова А.И., Пресич Г.,А., Навродская Р.А., Шеренковский Ю. В. Малецкая О.Е., Гнедаш Г.А.* Термодинамическая оптимизация и анализ эффективности теплоутилизационных систем котельных агрегатов // Пром. теплотехника. – 2012. – Т. 34, № 2. – С. 59–66.

Получено 22.12.2011 г.