

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРОВ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ В УСЛОВИЯХ ЗАПЫЛЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА

Н. М. Фиалко., доктор технических наук, чл.- корр. НАНУ

А. И. Степанова,, Р. А. Навродская, кандидаты технических наук

Институт технической теплофизики НАН Украины

e-mail: nmfialko@ukr.net

Аннотация. Изложены результаты исследования эффективности теплоутилизаторов стекловаренных печей в условиях запыленности теплообменных поверхностей. Приведены способ оценки максимально допустимой степени загрязнения теплообменных поверхностей теплоутилизаторов и результаты расчета рекомендуемых сроков их очистки.

Ключевые слова: *стекловаренные печи, теплоутилизаторы, коэффициент загрязнения.*

Неотъемлемой частью общей проблемы экономической стабильности в Украине является эффективное функционирование экономики страны путем устойчивого обеспечения всех видов производства топливно-энергетическими ресурсами. Одним из важных факторов экономии топливно-энергетических и материальных ресурсов является утилизация теплоты отходящих газов энергетических установок, которая позволяет в значительной степени компенсировать потребности предприятий в тепловой энергии, на производство которой в настоящее время затрачиваются дополнительные топливно-энергетические ресурсы.

На стекловырабатывающих предприятиях различного назначения утилизация теплоты отходящих газов связана с определенными трудностями, обусловленными наличием в отходящих дымовых газах значительного количества загрязняющих компонентов, содержание изменяется от 50 до 1000 мг/м³. Эти компоненты включают песок, соли натрия, алюминий, сажу, а также коррозионноактивные соединения азота, серы, углерода, фтора и других

вредных и химически агрессивных веществ в газообразной фазе. Твердые компоненты в составе дымовых газов вызывают образование на теплообменных поверхностях теплоутилизаторов, входящих в системы утилизации теплоты, слоя шлаковых отложений. В условиях высокой запыленности отходящих газов стекловаренных печей быстро образующийся на теплообменных поверхностях теплоутилизаторов слой отложений является препятствием к использованию эффективных развитых теплообменных поверхностей, включающих оребренные трубы, поскольку при сложной конфигурации теплообменной поверхности удаление загрязняющего слоя чрезвычайно затруднено. В этом случае эксплуатация теплоутилизатора происходит при наличии слоя отложений, что приводит к существенному снижению эффективности теплоутилизатора и в конечном итоге к потере работоспособности.

Цель исследований – на основе анализа эффективности воздухотрубного теплоутилизатора стекловаренной печи, работающего в условиях запыленности поверхностей нагрева, предложить критерии оценки максимально допустимой степени загрязнения теплообменных поверхностей и рекомендовать сроки их очистки.

Материалы и методика исследований. В работе использованы экспериментальные методы анализа эффективности газоздушных теплоутилизаторов в условиях запыленности теплообменных поверхностей.

В настоящее время для характеристики степени загрязнения теплообменных поверхностей используются различные коэффициенты [1,2]:

коэффициент загрязнения Ψ_3 (в некоторых источниках он носит название коэффициента тепловой эффективности φ), представляющий собой отношение коэффициентов теплопередачи запыленных и чистых поверхностей нагрева;

$$\text{коэффициент загрязнения } \xi = (1 - \varphi) / (\varphi \alpha^{\text{гр}}).$$

Результаты исследований. Для определения критерия оценки максимально допустимой степени загрязнения теплообменной поверхности

воздухотрубного теплоутилизатора проведены исследования эффективности указанного теплоутилизатора в зависимости от коэффициента загрязнения ξ . Для газоздушных теплоутилизаторов получена функциональная зависимость эксерго-технологического критерия эффективности $k_{ex}^T = (E_{пот} m_0)/Q$ от основных режимных и конструкционных параметров теплоутилизатора:

$$k_{ex}^T = \left\{ \ln \left(1 + \frac{T_{ВХ}^{ДГ} - T_{ВХ}^{В03}}{CT_{ВХ}^{В03} \left((1 + \xi \alpha_k^{ДГ}) / \alpha_{пр}^{ДГ} F_{II} + 1 / \alpha_k^{В03} F_{тр}^{ВНУГ} \right)} \right) + \right. \\ \left. + \ln \left(1 - \frac{(T_{ВХ}^{ДГ} - T_{ВХ}^{В03}) \psi}{CT_{ВХ}^{ДГ} \left((1 + \xi \alpha_k^{ДГ}) / \alpha_{пр}^{ДГ} F_{II} + 1 / \alpha_k^{В03} F_{тр}^{ВНУГ} \right)} \right) + \right. \\ \left. + \frac{Rl \rho^{В03} (w^{В03})^2}{2d_1 c_p^{В03} (1,82 \ln Re^{В03} - 1,64)^2 \mu_M^{В03} p_{ВХ}^{В03}} + D \frac{R \rho^{ДГ} (w^{ДГ})^2}{2\mu_M^{ДГ} p_{ВХ}^{ДГ} c_p^{ДГ}} \right\} \frac{T_0 m C}{Q}. \quad (1)$$

Для шахматного пучка:

$$D = 0,25(z_2 + 1), \quad (2)$$

$$\alpha_{пр}^{ДГ} = 0,127 (s_1' / d_2)^{-0,7} (Re^{ДГ})^{0,75} \lambda^{ДГ} [H + 1,1 F_{тр}^{нар} (1 - H) / F_{II}] / d_2, \quad (3)$$

$$F_{MEM} = lN(4s_2 - 2d_2), \quad F_{II} = lN(4s_2 - 2d_2 + \pi d_2), \quad h_{MEM} = 0,5(2s_2 - d_2). \quad (4)$$

Для коридорного пучка:

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

$$\alpha_{пр}^{ДГ} = 0,051 (Re^{ДГ})^{0,75} \lambda^{ДГ} [H + 1,1 F_{тр}^{нар} (1 - H) / F_{II}] / d_2, \quad (6)$$

$$F_{MEM} = 2lN(s_2 - d_2), \quad F_{II} = 2lN(s_2 - d_2 + 0,5\pi d_2), \quad h_{MEM} = 0,5(s_2 - d_2). \quad (7)$$

Общие для шахматного и коридорного пучков параметры:

$$\alpha_k^{В03} = k 0,022 (Re^{В03})^{0,8} (Pr^{В03})^{0,43} \lambda^{В03} / d_1, \quad (8)$$

$$H = th(fh_{\text{мем}}) / ph_{\text{мем}}, \quad f = \sqrt{\frac{2\alpha_{\text{к}}^{\text{дг}} v_{\text{мем}}}{\lambda_{\text{мем}} b (1 + \xi \alpha_{\text{к}}^{\text{дг}})}}, \quad v_{\text{мем}} = \frac{F_{\text{п}}}{F_{\text{мем}}} \left(1 - v_{\text{тр}} \frac{F_{\text{тр}}^{\text{нар}}}{F_{\text{п}}} \right), \quad (9)$$

$$F_{\text{тр}}^{\text{внут}} = lN\pi d_1, \quad F_{\text{тр}}^{\text{нар}} = lN\pi d_2, \quad (10)$$

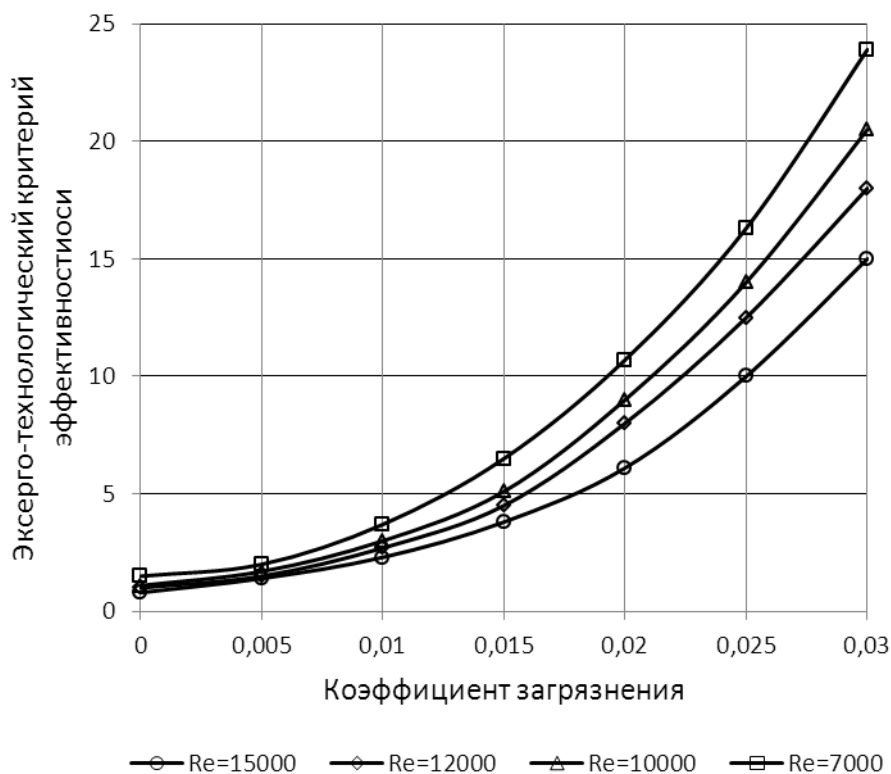
$$w^{\text{дг}} = (\text{Re}^{\text{дг}} \mu^{\text{дг}}) / (\rho^{\text{дг}} d_2), \quad w^{\text{воз}} = (\text{Re}^{\text{воз}} \mu^{\text{воз}}) / (\rho^{\text{воз}} d_1), \quad (11)$$

$$Q = \psi (T_{\text{вх}}^{\text{дг}} - T_{\text{вх}}^{\text{воз}}) / \left((1 + \xi \alpha_{\text{к}}^{\text{дг}}) / \alpha_{\text{пр}}^{\text{дг}} F_{\text{п}} + 1 / \alpha_{\text{к}}^{\text{воз}} F_{\text{тр}}^{\text{внут}} \right). \quad (12)$$

Здесь: 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; p – давление; Q – тепловая мощность; R – газовая постоянная; s_1 – расстояние между панелями; s_2 – расстояние между трубами в панели; s_2' – диагональный шаг пучка; T – температура; T_0 – температура окружающей среды; w – скорость; z_2 – количество труб в одном поперечном ряду трубного пучка; $\alpha_{\text{к}}$ – конвективный коэффициент теплоотдачи; $\alpha_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент теплоотдачи; λ – теплопроводность; $\mu_{\text{м}}$ – 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.

Коэффициент загрязнения ξ был введен в расчеты при получении выражения для эксерго-технологического критерия эффективности с целью учета влияния на коэффициент теплопередачи $\overline{k}^{дг}$ термического сопротивления загрязняющего слоя. Напомним, что увеличение эксерго-технологического критерия эффективности k_{ex}^T соответствует снижению эффективности теплоутилизатора.

На рисунке приведены графики зависимостей эксерго-технологического критерия эффективности k_{ex}^T от коэффициента загрязнения ξ трубного пучка теплоутилизатора при различных значениях числа Рейнольдса дымовых газов.



Зависимость эксерго-технологического критерия эффективности k_{ex}^T от коэффициента загрязнения трубного пучка ξ :

$$Re^{в03} = 15000; s_1 = 60\text{мм}; s_2 = 60\text{мм}; d = 30\text{мм}; k = 2,0; \Psi \approx 0,995$$

Как видно из рисунка, на всех стадиях образования отложений на теплообменной поверхности увеличение числа Рейнольдса для дымовых газов от 7000 до 15000 приводит к повышению эксерго-технологической эффективности теплоутилизатора (эксерго-технологический критерий эффективности k_{ex}^T снижается). При этом степень влияния числа Рейнольдса на эффективность теплоутилизатора повышается при увеличении степени загрязнения поверхности. Эксерго-технологический критерий эффективности при увеличении числа Рейнольдса от 7000 до 15000 снижается в 1,4 раза для $\xi=0$ и в 1,6 раза для $\xi=0,03$.

На представленных графиках в исследуемом диапазоне изменения чисел Рейнольдса наблюдаются три области изменения коэффициента загрязнения ξ : $0 \dots 0,008$; $0,008 \dots 0,018$ и $0,018 \dots 0,03$. На третьем участке, начиная со значений $\xi \approx 0,018$, происходит достаточно быстрое снижение эксерго-технологической эффективности теплоутилизатора (соответственно увеличению эксерго-технологического критерия эффективности). На этом участке степень снижения эксерго-технологической эффективности выше, по сравнению с первыми двумя, в среднем, в 2,5 раза. Расчеты показали, что к моменту достижения степени загрязнения мембранной поверхности, соответствующему началу третьего участка, потери эксергии увеличиваются, примерно, в 3 раза, а тепловая мощность Q уменьшается, в среднем, в 2 раза.

Рассматривая мембрану, покрытую пылевыми отложениями, как двухслойную пластину можно определить максимально допустимую толщину слоя пылевых отложений, после достижения которой целесообразно их удаление. В зависимости от изменения числа Рейнольдса от 15000 до 7000 толщина слоя изменяется от 3 мм до 6 мм, при этом до достижения этой толщины пылевые отложения, в основном, имеют рыхлую консистенцию. В среде дымовых газов стекловаренных печей производства стеклянной тары указанная степень загрязнения теплообменной поверхности и толщина слоя отложений достигается, в среднем, за 10...14 дней работы теплоутилизатора.

После двух недель работы воздухоотрубного теплоутилизатора происходит не только быстрое снижение его эксерго-технологической эффективности, но и уплотнение пылевых отложений, что в значительной степени затрудняет их удаление. Таким образом, после 10...14 дней работы воздухоотрубного теплоутилизатора для нормальной эксплуатации теплоутилизационного оборудования целесообразно удаление пылевых отложений с помощью специальной системы очистки поверхностей нагрева.

Приведенные результаты исследований эксерго-технологической эффективности воздухоотрубного теплоутилизатора свидетельствуют о том, что в качестве критерия оценки максимально допустимой степени загрязнения теплообменных поверхностей теплоутилизатора со стороны дымовых газов может служить степень снижения его эксерго-технологической эффективности.

Проведенные исследования позволили оценить тепловую эффективность поверхностей нагрева теплоутилизаторов различного типа в условиях запыленности потока дымовых газов, предложить способ оценки максимально допустимой степени загрязнения теплообменных поверхностей и на основе этого рекомендовать определенные сроки их очистки. Для печей, производящих стеклянную тару, рекомендованный период работы теплоутилизатора между очистками составляет 10...14 суток, для печей, производящих медицинское стекло, – 6...8 суток. При использовании газотрубных теплоутилизаторов для печей варки хрусталя рекомендованный период между удалениями пылевых отложений сокращается до 1,5...2 суток. Экспериментально установлены оптимальные скорости очистительного агента в зависимости от длины теплообменных труб в диапазоне изменения их длины от 1,0м до 2,5м.

Выводы

1. Получена функциональная зависимость эксерго-технологического критерия эффективности от основных режимных и конструкционных параметров воздухоотрубного теплоутилизатора стекловаренной печи, с

помощью которой рассчитаны зависимости эксерго-технологического критерия от степени загрязнения теплообменных поверхностей теплоутилизатора.

2. На основе проведенных исследований предложен способ оценки максимально допустимой степени загрязнения теплообменных поверхностей теплоутилизаторов и рассчитаны рекомендуемые сроки их очистки.

Список литературы

1. Оребренные поверхности нагрева паровых котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 165с.
2. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / Под ред. Кузнецова Н.В. – М.: Энергия, 1973. – 296с.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРІВ СКЛОВАРНИХ ПЕЧЕЙ В УМОВАХ ЗАПИЛЕНОСТІ ПОВЕРХОНЬ НАГРІВУАННЯ

Н. М. Фіалко., А. І. Степанова, Р. О. Навродська

Анотація. *Викладено результати дослідження ефективності теплоутилізаторів скловарних печей в умовах запиленості теплообмінних поверхонь. Наведено спосіб оцінки максимально дозволеного ступеню забруднення теплообмінних поверхонь теплоутилізаторів та результати розрахунку рекомендованих термінів їх очищення.*

Ключові слова: *скловарні печі, теплоутилізатори, коефіцієнт забруднення*

EFFICIENCY HEAT EXCHANGER GLASS FURNACES IN DUSTY CONDITIONS OF HEATING SURFACES.

N. Fialko, A. Stepanova, R. Navrodska

Annotation. The results of research on the effectiveness heat recovery glass furnaces in the dusty heat transfer surfaces. We present a method of estimating the maximum permissible degree of contamination of the heat transfer surfaces of heat recovery units and calculating the recommended deadlines for their cleaning.

Key words: *glass melting furnaces, heat exchanger, fouling factor*