

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КОНТАКТНОГО ТЕПЛОМАСООБМЕНА В ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОМ ЭЛЕМЕНТЕ ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА, ВЫПОЛНЕННОГО НА БАЗЕ ФОРСУНОЧНОЙ КАМЕРЫ

В настоящее время, в связи с существенным увеличением стоимости энергоресурсов, особое значение для горно-металлургического комплекса Украины приобретают вопросы энергосбережения. Повышение эффективности утилизации теплоты парогазовых выбросов является важным направлением снижения потерь теплоты на коксохимических производствах, использующих мокрый способ тушения кокса. Опыт создания отечественных установок для утилизации теплоты парогазовых выбросов мокрого тушения кокса показывает, что контактные теплоутилизаторы, выполненные на базе перфорированных лотков, обладают сравнительно низким тепловым КПД (максимальный КПД известных установок 51,7%) [1]. Поэтому повышение эффективности утилизации теплоты с помощью более эффективных контактных теплоутилизаторов, выполненных на базе форсуночных камер (ФК), представляет собой актуальную научную задачу, решение которой позволит обеспечить энергосбережение и экологическую безопасность технологии мокрого тушения кокса.

В рамках решения поставленной задачи: 1) разработаны новые тепломеханические схемы устройства и системы для мокрого тушения кокса, основанные на использовании контактных теплоутилизаторов, выполненных на базе ФК [1-3]; 2) определены перспективные направления обеспечения экологической безопасности технологии мокрого тушения [4]; 3) разработан алгоритм определения параметров систем утилизации теплоты при мокром тушении кокса [5]; 4) разработана методика проведения экспериментов и проведены экспериментальные исследования теплообмена в характеристическом элементе ФК опытной установки; 5) получены новые эмпирические зависимости для определения параметров теплообмена в ФК для условий наличия значительного «транзитного» потока парогазовой смеси через ФК [5, 6].

Проведены дополнительные теоретические и экспериментальные исследования для условий, при которых поток «полной» теплоты формируется за счёт потока «скрытой» теплоты, а поток «явной» теплоты составляет 1,5...2,5%, т.е. пренебрежимо мал. Математическое моделирование основывалось на одномерном переносе в характеристическом элементе теплоутилизатора, выполненного на базе ФК, в качестве которого рассматривалась единичная форсунка и ограниченный объём в зоне её действия. Пространственные характеристики ФК опытной установки подбирались исходя из условия обеспечения полного раскрытия факела распыла в первой фазе дробления струи [5, 6]. Исследования проводились с использованием методов, основанных на балансовых соотношениях и среднелогарифмических разностях потенциалов переноса и параметров состояния.

В общепринятых определениях для потоков «явной», «полной» и «скрытой» теплоты: величина потока «полной» теплоты определялась в соответствии с зависимостью:  $Q_{\Pi} = \sigma F \Delta t_{\text{ср.вс.}}$ , Вт, где  $\sigma F$  – произведение коэффициента массообмена на площадь контактной поверхности, кг/с; поток «явной» теплоты:  $Q_{\text{Я}} = \alpha F \Delta t_{\text{ср.вс.}}$ , Вт, где  $\alpha F$  – произведение коэффициента теплообмена на

площадь контактной поверхности, Вт/°К; величина потока «скрытой» теплоты:  $Q_r = g_k r$ , Вт, где  $g_k$  – расход конденсата на выходе из ФК, кг/с;  $r$  – теплота фазового перехода водяных паров, кДж/кг.

В связи с невозможностью установления параметров контактной поверхности при математическом моделировании использованы усреднённые характеристики результатов процессов переноса, выражаемые произведениями коэффициентов переноса на площадь контактной поверхности. В качестве определяющего параметра контактного теплообмена было принято произведение коэффициента теплообмена на площадь контактной поверхности  $\sigma F$ . В ходе экспериментов величина произведения коэффициента теплообмена на площадь контактной поверхности  $\sigma F$  определялась в соответствии с зависимостью:

$$\sigma F = \frac{G(I_1 - I_2)}{\Delta t_{cp,acc}} = \frac{G_w c_w (t_{w2} - t_{w1}) + g_k c_w (t_k - t_{w2})}{\Delta t_{cp,acc}}, \text{ кг/с}$$

где  $t_{w1}$  – температура теплоносителя на входе в ФК, °К;

$t_{w2}$  – температура теплоносителя на выходе из ФК, °К;

$t_k$  – температура конденсации пара, °К,

$g_k$  – расход конденсата в ФК, кг/с, комплексная характеристика массоотдачи  $\beta F$  в соответствии с зависимостью:

$$\beta F = \frac{g_k}{\Delta p_{cp,acc}}, \text{ кг/(Па}\cdot\text{с)}.$$

Адекватное регрессионное уравнение (постулируемая модель) для определения произведения коэффициента теплообмена на площадь контактной поверхности  $\sigma F$  в характеристическом элементе ФК представляется в виде:

$$\sigma F = A_1^{X_1} A_2^{X_2} A_3^{X_3} \dots A_n^{X_n} \quad (1)$$

где  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  – значения критериев и коэффициентов, характеризующих теплообменные процессы, протекающие в ФК;

$X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  – экспериментальные значения показателей степеней регрессионного уравнения [7].

В результате анализа микроуровня взаимодействия между веществом капли теплоносителя и парогазовой смесью было установлено, что наибольшее влияние на прогрев капли оказывают её размеры и режим движения. Сделан вывод об определяющем влиянии качественных параметров работы форсунок на теплообменные процессы в характеристическом элементе ФК. Известно, что максимальная эффективность распыливания теплоносителя наблюдается в первой фазе дробления струи, которая описывается на основе теории локальной структуры турбулентности, в соответствии с теоретической зависимостью А.Н.Колмогорова и уравнением

Розина-Раммлера для качественных параметров работы форсунок, соответственно:  $\frac{d_k}{d_3} = \frac{const}{Re_3^n}$  и

$\lg \lg \frac{100}{R} = n \lg d_l - n \lg d_k + \lg \lg e = const + n \lg d_l$ , где  $d_k$  – диаметр капель, м;  $Re_3$  – число Рейнольдса для эквивалентного диаметра форсунки;  $n$  – угловой коэффициент прямой получаемый графически [8]. Исходя из переменных условий истечения, среднемассовый диаметр капель принимается условным.

После подстановки опытных значений произведений коэффициента теплообмена на площадь контактной поверхности  $\sigma F$  (переменных откликов) и критериев и коэффициентов (факторов), включая: отношения условных среднемассовых диаметров капель в спектре распыла к эквивалентному диаметру форсунки  $d_k^y/d_3$ ; чисел Рейнольдса для эквивалентного диаметра сопла форсунки  $Re_3$ ; отношения массовых расходов парогазовой смеси и теплоносителя –  $B$ , постулируемая модель представляется в виде нелинейной мультипликативной функции и может быть приведена к линейному виду с помощью логарифмирования по основанию  $e$ . При этом для улучшения операбельности окончательного уравнения регрессии показатель степени при параметре  $B$  принимается равным 1. После логарифмирования по основанию  $e$  и окончательных преобразований сформирована переопределённая система линейных уравнений, при решении которой найдены наиболее вероятные значения неизвестных  $X_1=2,32$ ,  $X_2=0,56$ . При этом точность корреляции составляла  $\Delta Y=3,49$  %. В ходе проведения регрессионного анализа по методу

исключений было установлено, что факторы, входящие в зависимость 5, наилучшим образом отображают функциональную связь с переменными откликами.

После подстановки значений показателей степеней и коэффициента расхода экспериментальной установки  $A_1=10^{-3}$  кг/с эмпирическая зависимость для определения произведения коэффициента массообмена на площадь контактной поверхности  $\sigma F$  представляется в виде:

$$\sigma F \times 10^3 = B \times (d_k^y / d_3)^{2,32} Re_3^{0,56} \quad (2)$$

Модель с высокой точностью отображает реальные процессы протекающие в ФК применительно к параметрам парогазовой смеси, характерным для мокрого тушения кокса и действует в следующих интервалах значений:

- 1) среднелогарифмическая разность энтальпий  $\Delta I_{cp, пар.}$ , кДж/кг: 149,3...304,7;
- 2) поток «полной» теплоты  $Q_n$ , Вт: 149...178;
- 3) отношение произведения коэффициента массообмена на площадь контактной поверхности к коэффициенту расхода экспериментальной установки  $\sigma F/A_1=1000\sigma F$ : 0,48...1,16;
- 4) отношение условного среднемассового диаметра капель к эквивалентному диаметру сопла тангенциальной механической форсунки  $d_k^y/d_3$ : 0,36...0,69;
- 5) отношение расхода пара на входе в ФК к расходу теплоносителя, подаваемого через форсунку  $B$ : 0,0043...0,026;
- 6) число  $Re_3$ : 22881...11970;
- 7) константа распределения  $n=2$ ;
- 8) среднелогарифмическая разность температур  $\Delta t_{cp, пар.}$ , °C: 34...77;
- 9) тепловой КПД ФК  $\eta$ , %: 75...98;
- 10) приток конденсата к теплоносителю  $g_k$ , кг/с: 5,5E-05...6,9E-05;
- 11) среднелогарифмическая разность парциальных давлений  $\Delta P_{cp, пар.}$ , кПа: 8,7...120,4;
- 12) комплексная характеристика массоотдачи в ФК,  $\beta F$ : 7,1E-09...8,4E-12;
- 13) температура парогазовой смеси на входе в ФК экспериментальной установки,  $t_{ex}$  °C: 95...110;
- 14) массовая доля пара в парогазовой смеси,  $\varphi$  %: 4...30;
- 15) абсолютное давление на входе в ФК  $P_{ex}$ , кПа: 91,2...131,7. В исследованном интервале значений получено регрессионное уравнение между произведением коэффициента массообмена на площадь контактной поверхности и комплексной характеристикой массоотдачи:  $\sigma F/A_1 = \sigma F \cdot 10^3 \approx 6,02 \cdot \beta F^{0,1004}$  (квадрат множественной корреляции  $R^2 = 0,7$ ). Тепловой КПД ФК экспериментальной установки  $\eta$  определялся в соответствии с зависимостью:

$$\eta = \frac{Q_n}{Q_{ex}} \times 100 = \frac{\sigma F \Delta I_{cp, пар.}}{G_{пар.} \Delta I} \times 100, \%$$

Разработан алгоритм определения параметров работы характеристических элементов ФК с заданной тепловой эффективностью, выражаемой тепловым КПД ФК  $\eta$  %, который предполагает следующую последовательность расчетов:

- 1) Первоначально определяем значение произведения коэффициента массообмена на площадь контактной поверхности  $\sigma F$  для характеристического элемента ФК экспериментальной установки, по заданному значению теплового КПД характеристического элемента ФК промышленного теплоутилизатора  $\eta$  %. Для этого в формулу:  $\sigma F = \frac{\eta G_{пар.} \Delta I}{\Delta I_{cp, пар.} 100}$  подставляем заданные значения

$\Delta I_{cp, пар.}$  и  $G_{пар.}$  (в первом приближении расход парогазовой смеси на входе в ФК экспериментальной установки принимается равным  $G_{пар.} = 5,5 \cdot E05$  кг/с).

- 2) Находим поток «полной» теплоты в ФК экспериментальной установки:  $Q_n = \sigma F \Delta I_{cp, пар.}$ , Вт, и, по известному значению  $\sigma F$ , определяем расход теплоносителя на форсунке  $g_\phi$  в ФК экспериментальной установки:  $g_\phi = \frac{Q_n}{c_B (t_1 - t_2)}$ , кг/с, где  $t_1 - t_2$  – заданная разность

температур теплоносителя на входе и выходе из характеристического элемента ФК промышленного теплоутилизатора, °K.

- 3) Устанавливаем численные значения факторов формирования контактной поверхности  $Re_3$  и  $d_k^y/d_3$  в ФК:  $\sigma F / (A_1 \cdot B) = (d_k^y / d_3)^{2,32} Re_3^{0,56}$  и производим подбор форсуночного устройства для

ФК промышленного теплоутилизатора.

По результатам обработки экспериментальных данных получены графические зависимости между тепловым КПД ФК и среднелогарифмической разностью энтальпий в ФК, представленные на рис. 1.

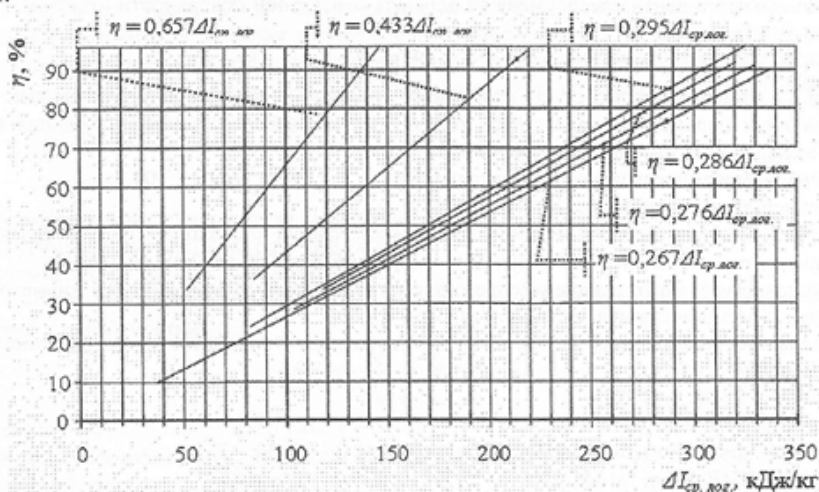


Рис. 1. Диаграмма тепловой эффективности ФК экспериментальной установки (исследованные диапазоны значений  $\eta$ , %: 75...98;  $\Delta I_{cp, log}$ , кДж/кг: 149,3...304,7)

Определены численные соотношения между качественными параметрами работы тангенциальных механических форсунок:  $d_k^y/d_s$ ,  $Re_3$  и величиной «полного» теплового потока  $Q_n$  подводимого к теплоносителю в характеристическом элементе ФК, представленные в виде графических зависимостей рис. 2 и рис. 3. После определения численных значений качественных параметров работы ФК  $Re_3$  и  $d_k^y/d_s$ , полученных для условий характеристического элемента ФК экспериментальной установки и выполнения условий алгоритма определения параметров работы характеристического элемента ФК с заданной эффективностью, условия подбора форсуночного устройства для ФК промышленного теплоутилизатора представляются в виде:

$$\frac{d_k}{d_s} Re_3^2 = \frac{d_{k1}}{d_{s1}} Re_{31}^{n1}; \tag{3}$$

$$(d_k^y/d_s)^{2,32} Re_3^{0,56} = (d_{k1}^y/d_{s1})^{2,32} Re_{31}^{0,56}, \tag{4}$$

где  $Re_{31}$ ,  $d_{k1}^y/d_{s1}$  – качественные параметры работы форсуночного устройства промышленной технологии;

$n1$  – константа распределения для форсуночного устройства промышленного контактного теплоутилизатора.

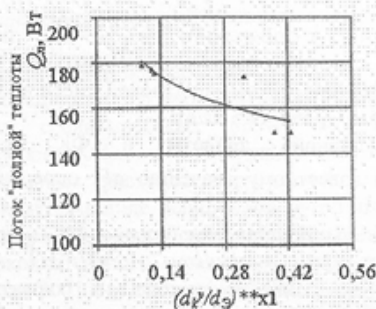


Рис. 2. График зависимости между опытными значениями «полного» теплового потока  $Q_n$  и  $(d_k^y/d_s)^{X1}$ , где  $X1=2,32$ ,  $R^2 = 0,7$

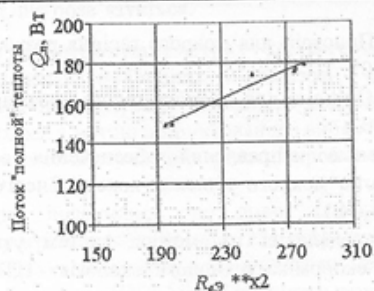


Рис. 3. График зависимости между опытными значениями «полного» теплового потока  $Q_n$  и числом  $Re_3^{*2}$ , где  $X_2 = 0,56$ ,  $R^2 = 0,75$

После определения численных значений факторов  $Re_3$ ,  $d_k^y/d_3$ , правильность подбора форсуночного устройства и режима его работы должна быть подтверждена выполнением условия 4. Зависимости 3), 4) действуют для геометрически подобных камер и позволяют произвести подбор форсунки для характеристического элемента ФК промышленной технологии из 160 различных типов тангенциальных механических форсунок [5, 6, 8].

### Выводы

1. Разработана математическая модель и проведены экспериментальные исследования теплообмена в характеристическом элементе теплоутилизатора на базе форсуночной камеры.
2. Получена эмпирическая зависимость для определения произведения коэффициента массообмена на площадь контактной поверхности применительно к процессам утилизации теплоты при мокром тушении.
3. Разработан алгоритм определения параметров работы характеристического элемента форсуночной камеры промышленного теплоутилизатора с заданной тепловой эффективностью, выражаемой тепловым КПД.
4. Получена зависимость, основанная на выполнении условий теории подобия, для распространения результатов экспериментов на промышленные теплоутилизаторы, выполненные на базе форсуночных камер.

### Список сокращений и условных обозначений

- ФК - форсуночная камера;  
 $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>°К);  
 $\sigma$  - коэффициент массообмена, кг/(м<sup>2</sup>с);  
 $F$  - площадь контактной поверхности, м<sup>2</sup>;  
 $Q_n$  - поток «полной» теплоты, Вт;  
 $\Delta t_{ср.лог.}$  - среднелогарифмическая разность энтальпий, кДж/кг;  
 $Q_n$  - поток «явной» теплоты, Вт;  
 $\Delta t_{ср.лог.}$  - среднелогарифмическая разность температур, °К;  
 $Q_r$  - поток «скрытой» теплоты, Вт;  
 $\beta$  - коэффициент массоотдачи, кг/(Па·с·м<sup>2</sup>);  
 $\Delta p_{ср.лог.}$  - среднелогарифмическая разность парциальных давлений, Па;  
 $d_k$  - среднемассовый диаметр капель, м;  
 $d_k^y$  - условный среднемассовый диаметр капель, м;  
 $Re_3$  - число Рейнольдса для эквивалентного диаметра форсунки;  
 $d_3$  - эквивалентный диаметр сопла форсунки, м;  
 $\Delta I$  - разность энтальпий парогазовой смеси на входе и выходе из ФК, кДж/кг;  
 $G_{пар}$  - расход парогазовой смеси на входе в ФК, кг/с;  
 $\eta$  - тепловой КПД ФК, %;  
 $Q_{вх}$  - поток теплоты на входе в ФК, Вт.

### Литература

1. Сургаев В. В. Система утилизации тепла и обезвреживания вредных выбросов при мокром тушении раскисленного кокса// Научно-технический сборник: Разработка рудных

- месторождений.-2002. -№78.
2. Патент України №42199А. Пристрій для мокрого гасіння розжареного кокса/ Суртаєв В. В., Суртаєв В. М.- Бюл. №9.- 2001.
  3. Патент України №44003А. Система для мокрого гасіння розжареного коксу/ Суртаєв В. В., Суртаєв В. М.- Бюл. №1.- 2002.
  4. Суртаєв В. В. Перспективные направления обеспечения экологической безопасности установок утилизации теплоты мокрого тушения кокса// Енергетика: економіка, технології, екологія. - НТУУ КПИ.-2003.-№1.
  5. Суртаєв В. В. Алгоритм определения параметров систем утилизации теплоты мокрого тушения кокса// Енергетика: економіка, технології, екологія. - НТУУ КПИ.-2004.-№2.
  6. Суртаєв В. В. Экспериментальное определение показателей интенсивности тепломассообмена для систем утилизации теплоты процессов мокрого тушения кокса// Енергетика: економіка, технології, екологія. - НТУУ КПИ.-2004.-№1.
  7. Н.Дрейспер, Г.Смит Прикладной регрессионный анализ/ Перевод с английского, научное предисловие Ю.П.Адлера, В.Г.Горского. - М.: Статистика. - 1973.- 392 с.
  8. Хавкин Ю. И. Экспериментальное определение качества распыливания топлива центробежными форсунками большой производительности/ В кн.: Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики. - Алма-Ата.: Наука. - 1966. - С. 70-80.