

окружающую среду; безопасные условия труда для обслуживающего персонала вследствие низкого напряжения электролиза; отсутствие металлоемкого компрессорного оборудования и сложных систем электропневмоавтоматики; высокая степень автономности; малые габаритные размеры), можно сделать вывод о высокой перспективности машин данного типа в различных областях промышленного производства, связанных с применением импульсных (ударных) технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Согришин Ю. П., Гришин Л. Г., Воробьев В. М. Штамповка на высокоскоростных молотах. — М.: Машиностроение, 1978. — 167 с.
2. Степанов В. Г., Шавров И. А. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов. — М.: Машиностроение, 1975. — 278 с.
3. Барановский М. А., Подрабинник И. М. Новая технология и оборудование штамповочного производства. — Мн.: Беларусь, 1981. — 191 с.
4. Разработка способа повышения эффективности работы газодинамических машин ударного действия: Отчет о НИР / Рук. И. В. Качанов №Р 2 0 001157. — Мн.: БГПА, 2000. — 94 с.
5. А. с. 1394546 СССР. Высокоскоростной молот / И. В. Качанов и др. / № 4115989/31—27; Заявлено 26.06.86. не публ.
6. Качанов И. В., Кондратович А. Н., Ивашечкин В. В. Высокоскоростной молот; заявка № и20010024 от 31.01.2001 на выдачу патента РБ на полезную модель.
7. Водород: Свойства, получение, хранение, транспортировка, применение / Под ред. Д. Ю. Гамбурга, Н. Ф. Дубовкина. — М.: Химия, 1989. — 672 с.
8. Андреев К. К., Беляев А. Ф. Теория взрывчатых веществ. — М.: Оборонгиз, 1960. — 595 с.

Представлена научно-техническим советом НИЛ «Энергострой»

Поступила 23.03.2001

УДК 536.244+621.032

ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ТЕПЛООТДАЧИ В АППАРАТЕ НАСАДОЧНОГО ТИПА СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ДОМЕННОГО ГАЗА ОТ CO₂

Докт. техн. наук, проф. НЕСЕНЧУК А. П., канд. техн. наук, проф. КОПКО В. М.,
канд. техн. наук, доц. ЧЕРНЫШЕВИЧ В. И., инж. РЫЖОВА Т. В.

Белорусская государственная политехническая академия

При учете изменений физических характеристик потока и влияния их на теплообмен через определяющую температуру существенными переменными, определяющими процесс внешнего теплообмена, являются

$$f(\bar{\alpha}, \Delta a, a_m, C_{эф}, \lambda_{эф}, \rho_{сс}, d_{чз}, d_{нз}, L, \dots, S_3, \omega_T) = 0. \quad (1)$$

Все величины в (1) имеют размерности, определяемые как комбинации следующих основных размерных величин: длина, м; масса, кг; температура, К; время, с; количество сорбата, моль. Тогда согласно теории размерностей, в частности π -теоремы Бэкингема [1], число независимых безразмерных комбинаций, необходимое для соотношения, описывающего данное явление, определяется разностью $N_n - N_p$. Учитывая, что $N_n = 11$, число величин, входящих в (1), а $N_p = 5$ — число основных размерных величин, в них входящих, необходимое число безразмерных комбинаций для описания теплообмена равно 6.

Для нахождения искомых комбинаций представим π в виде произведения переменных в некоторой степени

$$\pi = \alpha^{m_1} a^{m_2} a^{m_3} C_{\text{эф}}^{m_4} \lambda_{\text{эф}}^{m_5} d_{\text{чз}}^{m_6} d_{\text{нз}}^{m_7} \rho_{\text{сс}}^{m_8} L^{m_9} S_3^{m_{10}} \omega_{\tau}^{m_{11}}.$$

Запишем также размерности величин

$$\begin{aligned} \pi = & [M/(ч^3 \cdot \tau)]^{m_1} [\text{моль}/M]^{m_2} [\text{моль}/M]^{m_3} [L^2/\tau^2 \cdot \tau]^{m_4} [ML/\tau^3 \cdot \tau]^{m_5} \cdot \\ & \cdot [L]^{m_6} [L]^{m_7} [M/L^3]^{m_8} [L]^{m_9} [L]^{m_{10}} [L/\tau]^{m_{11}}. \end{aligned}$$

Величина π будет безразмерной, если показатели степени основных величин равны нулю:

$$\begin{aligned} m_1 - m_2 - m_3 + m_5 + m_8 &= 0 && (\text{для } M); \\ -3m_1 - 2m_4 - 3m_5 - m_{11} &= 0 && (\text{для } \tau); \\ -m_1 - m_4 - m_5 &= 0 && (\text{для моля}); \\ 2m_4 + m_5 - 3m_8 + m_6 + m_7 + \sum_{i=9}^{11} m_i &= 0 && (\text{для } L). \end{aligned} \quad (2)$$

Выбирая произвольно значения шести показателей степени, оставшиеся пять для каждого безразмерного комплекса, π находим, решая систему (2). Уравнение подобия запишется в виде

$$N_n = n_0 \text{Pe}^{n_1} \left(\frac{d_{\text{нз}}}{d_{\text{чз}}} \right)^{n_2} \left(1 + \frac{\text{Па}_0}{100a} \right)^{n_3} \left(1 + \frac{d_{\text{тп}}}{nS} \right)^{n_4}, \quad (3)$$

где $\text{Pe} = (\omega_{\tau} d_{\text{нз}} \rho_{\text{сс}} C_{\text{эф}}) / \lambda_{\text{эф}}$ — модифицированное число Пекле.

Поскольку течение потока является внутренним движением в насадке, в качестве характерного размера принимался эквивалентный диаметр газовых прослоек, рассчитанный по соотношению [2]:

$$d_{\text{нз}} = \frac{4\varepsilon_{\text{н}}}{S_0(1 - S_{\text{н}}) + S_{\omega}},$$

где

$$\varepsilon_n = 1 - \frac{\rho_3}{\rho_m}$$

Величина размеров частиц найдена из выражения

$$d_{чз} = \sum_{i=1}^n q_i d_i,$$

где q_i — относительные массовые доли частиц размером d_i .

В итоге $d_{чз} = 0,304 \cdot 10^{-3}$ м.

Скорость твердой фазы в модифицированном числе Пекле рассчитывалась по выражению

$$\omega_T = 1,5 G h_0 / [\rho_{cc}(\varepsilon_n - \varepsilon_b)],$$

где 1,5 — коэффициент извилистости; h_0 — высота слоя; ε_b — коэффициент, учитывающий пустоты, непроходимые для твердой фазы, $\varepsilon_b = 0,75 (1 - \varepsilon_n)(\varepsilon_n - 0,2)$.

Плотность системы адсорбент — газовый поток

$$\rho_{cc} = \rho_T (1 - \varepsilon_{cc}),$$

где ε_{cc} — порозность слоя в насадке,

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon' (\omega / \omega_K)^{\psi_H}$$

(ε' — порозность слоя в насадке при скорости ω_K начала псевдоожижения определяется по формулам однородного псевдоожижения).

Показатель степени ψ_H для $A_T \approx 10^2 \dots 10^4$ определяется из выражения

$$\psi_H = 0,0775 A_T^{0,14}.$$

Для расчета значений эффективной теплоемкости можно воспользоваться зависимостью [3]

$$C_{эф} = \sum_{i=1}^n C_{p_i q_i} + \left(\frac{\partial a}{\partial T} \right)_p r. \quad (4)$$

Эффективная теплопроводность системы запишется

$$\lambda_{эф} = \lambda_r \left[1 + \frac{(1 - \varepsilon)(1 - \lambda_r / \lambda_T)}{\lambda_r / \lambda_T + 0,28 \varepsilon^{0,63} (\lambda_r / \lambda_T)^{0,68}} \right].$$

При расчете равновесного содержания сорбата в системе CaA—CO₂ для нахождения величины $(\partial a / \partial T)_p$, входящей в (4), использовалось известное уравнение Дубинина—Астахова

$$a = \omega_0 \rho_c \exp \left[- \left(\frac{R_\mu T \ln \frac{p_s}{p}}{E} \right)^2 \right],$$

где $E = 16,16$ кДж/кмоль.

В этом случае $(\partial a / \partial T)_p$ запишется

$$\left(\frac{\partial a}{\partial T} \right) = -3,7 W_0 \exp \left[- \frac{R_\mu T \ln \frac{p_s}{p}}{E} \right] - 2a \frac{R_\mu^2 T \ln \frac{p_s}{p}}{E^2} \left[\ln \frac{p_s}{p} + \frac{\Delta H}{R_\mu T} \right].$$

Регрессионное уравнение

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} x_i x_j$$

аппроксимировалось уравнением подобия в форме (3), при этом коэффициенты n_i находились методом наименьших квадратов. Расчеты велись на ЭВМ. В результате получено уравнение подобия

$$N_4 = 0,79 \text{Pe}^{0,14} \left(\frac{d_{нз}}{d_{чз}} \right)^{0,57} \left(1 + \frac{\text{Па}_0}{100 a_m} \right)^{-1,56} \left(1 + \frac{d_{тр}}{nS} \right)^{-3,9}. \quad (5)$$

Уравнение подобия (5) может быть использовано для расчета конвективного теплообмена при десорбции в термопсевдооживленном потоке в диапазоне изменения величин: $240 \leq \text{Re} \leq 1200$;

$$12,7 \leq \frac{d_{нз}}{d_{чз}} \leq 43,7; \quad 0,1 \leq \frac{\text{Па}_0}{100 a_m} \leq 0,2; \quad 4 \leq \frac{d_{тр}}{nS} \leq 6.$$

Как показали расчеты, в исследованной области 86 % точек аппроксимировались зависимостью (5) с погрешностью до 7 % и лишь 14 % точек, лежащих в зоне малых значений $\bar{\alpha}$, дают погрешность до 13 %.

Численное моделирование процессов тепло- и массопереноса позволяет сделать оценку основных технологических и геометрических характеристик десорбера с термопсевдооживленным потоком. Для исследования поведения системы был проведен численный эксперимент [4], в котором варьировались различные параметры относительно базового варианта ($d_{тр} = 0,016$ м; $X_0 = 0,21$ м; $d_T = 0,15 \cdot 10^{-3}$ м; $Q_{\max} = 30 \cdot 10^3$ Вт/м²; $a_0 = 13$ %; $G = 2,2$ кг/(м²·с); $Y_0 = 0,0175$ м; $T_0 = 293$ К; $Q_{\min} = 10 \cdot 10^3$ Вт/м²).

Во всех вариантах расчетов оставались постоянными:

- а) температура цеолита на входе в десорбер $T_0 = 293$ К;
- б) порозность потока на выходе из аппарата $\varepsilon = 0,4$;
- в) адсорбционные характеристики в системе СаА-СО₂ — $E = 19190$ Дж/моль; $W = 0,25$ см³/г;
- г) высота аппарата $X_0 = 0,21$ м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крей Г. Ф., Блэн У. Основы теплопередачи / Пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — 512 с.
2. Интенсификация процессов тепло- и массообмена при регенерации мелкодисперсного цеолита в гравитационном потоке / А. П. Несенчук, В. Н. Романюк, В. А. Седнин и др. // Теплообмен-VI: Материалы VI Всесоюз. конф. по теплообмену (Минск, май 1980). — Мн.: ИТМО АН БССР. — 1980. — Т. 6. Ч. 1. — С. 39–43.
3. Романюк В. Н. Интенсификация процессов тепло- и массопереноса и снижение энергозатрат при тепловой регенерации дисперсного адсорбента в промышленных установках: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Мн., 1980. — 27 с.
4. Металлургия. — 1999. — № 1. — С. 41–44.
5. Энергоэкологические аспекты целесообразности очистки доменного газа перед его сжиганием в нагревательных печах металлургических переделов / А. П. Несенчук, В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова и др. // Литье и металлургия. — 1999. — № 1. — С. 41–44.

Представлена кафедрой
промтеплоэнергетики и теплотехники

Поступила 20.03.2001

УДК 621.316

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ СИСТЕМНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАЦИОННЫХ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПТУ

Докт. техн. наук, проф. КАЧАН А. Д.

Белорусская государственная политехническая академия

Инж. ЛЕВШИН Н. В.

РУП «БелНИПИЭнергопром»

Одним из способов повышения системной эффективности утилизационных парогазовых установок (УПГУ) является совершенствование их паротурбинной части (ПТУ). Согласно [1], КПД УПГУ по производству электроэнергии

$$\eta_{\text{ПГУ}} = \eta_{\text{ГТУ}} + (1 - \eta_{\text{ГТУ}})\eta_{\text{ПТУ}}\eta_{\text{КУ}}\eta_{\text{ТП}}, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{ГТУ}}$ — электрический КПД ГТУ;

$\eta_{\text{КУ}}$, $\eta_{\text{ПТУ}}$ — КПД котла-утилизатора и ПТУ;

$\eta_{\text{ТП}}$ — КПД теплового потока.

Продифференцировав выражение (1), получим

$$\frac{d\eta_{\text{ПГУ}}}{d\eta_{\text{ПТУ}}} = (1 - \eta_{\text{ГТУ}})\eta_{\text{КУ}}\eta_{\text{ТП}} \cdot \quad (2)$$