

Сопоставление расчетов, выполненных при $\epsilon_\lambda = \epsilon_c = 0$, с численным решением исходной задачи на ЭЦВМ показало надежность разработанного алгоритма: максимальное расхождение результатов не превышает 3–3,5 %.

Вследствие расчленения процесса нагрева на два этапа необходимы дальнейшие исследования температур во времени в инерционном этапе (как правило $0 \leq Fo \leq 0,2$) с целью установления максимальных температурных градиентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кавадеров А.В., Самойлович Ю.А. О расчетах нагрева массивных тел излучением // Горение, теплообмен и процессы нагрева металла: Сб. науч. тр. Свердловск, 1963. – № 10. – С. 14–50.
2. Постольник Ю.С. К вопросу о функции распределения температуры по сечению тел, нагреваемых излучением // Изв. вузов. Черная металлургия.–1968. – № 6. – С. 160–164.
3. Саломатов В.В. Методы расчета нелинейных процессов теплового переноса. – Томск, 1976. – 245 с.
4. Лыков А.В. Методы решения нелинейных уравнений нестационарной теплопроводности//Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1970. – № 5. – С. 109–150.

УДК 66.096.5

А.П.НЕСЕНЧУК, канд.техн.наук
(БПИ)

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АДСОРБЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ТЕРМОПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ СОРБЕНТА

Адсорбционные процессы нашли широкое применение в современных технологиях различных производств. На машиностроительных заводах такие процессы используются при получении технологических атмосфер и диоксида углерода в результате разделения компонентов продуктов сгорания органического топлива. Существующие способы такого разделения, основанные на использовании традиционного жидкого сорбента, достаточно энергоемки из-за несовершенства стадии регенерации ряда свойств сорбента (табл. 1).

Даже поверхностный анализ указывает на значительные возможности совершенствования этих технологий и снижения энергозатрат отдельных процессов.

Т а б л и ц а 1

Сравнительная характеристика сорбентов, используемых
в промышленности

Свойства сорбента	Абсорбент МЭА	Адсорбент СаА
Сорбционная способность, кг/кг	0,05	0,25
Теплота сорбции, кДж/кг	2300	1000
Теплоемкость, кДж/кгК	3,8	0,9
Температура десорбции, К	390–403	473–573

Выполненные исследования [1—4] выделились в 1975 г. в научное направление, связанное с разработкой принципиально нового способа регенерации синтетических сорбентов, которое сегодня успешно развивается в рамках республиканского и отраслевого планов НИР Министерства тракторного и сельскохозяйственного машиностроения СССР.

Было предложено в адсорбционной системе использовать более перспективный сорбент СаА (табл. 1) и заменить неподвижный плотный слой гравитационным термопсевдооживленным. Такая замена позволила сделать процесс непрерывным и легко управляемым, а также получить чистый целевой продукт. Замена сорбента и использование его псевдооживленного состояния способствовали сокращению энергозатрат на 30 %. Применение же в качестве исходного сырья бросовых продуктов сгорания огнетехнических установок позволяет организовать малоотходную технологию.

В системе, где псевдооживляющим агентом является сорбат, который получается при тепловой регенерации сорбента, твердая частица СаА, находящаяся вблизи обогреваемой поверхности, подвергается тепловому воздействию. Данное явление протекает благодаря непосредственному контакту потока сорбента с лучеиспускающей поверхностью и движущемуся потоку нагретого газа, что в итоге приводит к неравномерному нагреву частиц. В работах [1, 2] показано, что неравномерно нагретая частица сорбента получает механический импульс в направлении, противоположном температурному градиенту.

Для сферической частицы было получено:

$$F_c = 2\pi \frac{\lambda^2 \Delta T_0}{\epsilon^2 \rho''} (1 - \rho''/\rho') r \operatorname{grad} T ;$$

$$X = \frac{U_0 - \chi_2 (X_0 - a_0 \tau_c^2)}{x_1 - x_2} \exp \chi_1 \tau -$$

$$- \frac{U_0 - \chi_1 (X_0 - a_0 \tau_c^2)}{x_1 - x_2} \exp \chi_2 \tau + a_0 \tau_c^2 ;$$

$$U_X = \frac{x_1}{x_1 - x_2} [U_0 - \chi_2 (X_0 - a_0 \tau_c^2)] \exp \chi_1 \tau -$$

$$- \frac{x_2}{x_1 - x_2} [U_0 - \chi_1 (X_0 - a_0 \tau_c^2)] \exp \chi_2 \tau ,$$

где F_c — сила сорбофореза, впервые введенная и описанная в работе [3].

После удара о стенку частица десорбирует до момента возникновения адсорбционного равновесия, причем основная масса сорбента выделяет сорбат вблизи нагретой поверхности. Газовыделение с частицы и сила сорбофореза, направленная от поверхности, нарушают однородность псевдооживления и вызывают образование газовой прослойки (рис. 1). Эта прослойка изучена впервые при рентгеновском фотографировании псевдооживленного слоя сорбента в процессе его нагревания.

Наличие газовой прослойки наделяет аппарат с термопсевдооживленным слоем индивидуальными свойствами: частица, получившая от стенки тепловой импульс, десорбирует газ и под действием силы сорбофореза пролетает через газовую прослойку. Температура частицы вследствие десорбции при этом реч

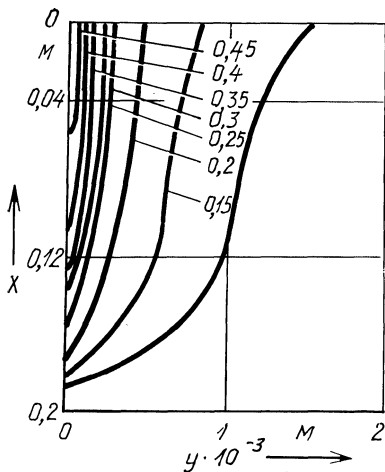


Рис. 1. Форма газовой прослойки в системе с вертикальным пучком цилиндрических труб при $a_0 = 10\%$; $T_0 = 293\text{ K}$; $G = 8,3\text{ кг/м}^2\text{с}$; $Q = 100\text{ кВт/м}^2$.

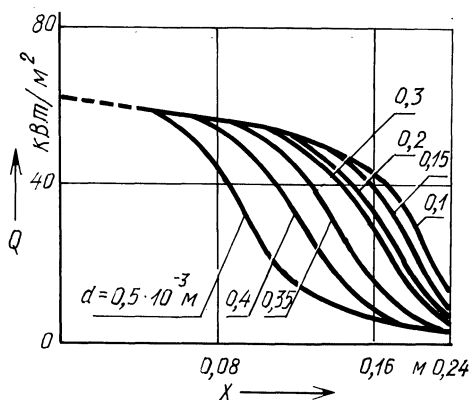


Рис. 2. Зависимости части теплового потока от стенки, восполняющей теплоту десорбции (не идущей на нагрев частиц), от глубины аппарата и диаметра частиц при $a_0 = 10\%$; $T_0 = 293\text{ K}$; $G = 8,3\text{ кг/м}^2\text{с}$; $Q = 100\text{ кВт/м}^2$.

ко падает, и на границе газовой прослойки с зоной псевдооживления твердая фаза отдает остаток избыточного тепла, сталкиваясь с холодными частицами. Затем она проходит зону псевдооживления и попадает в зону плотной упаковки сорбента. В итоге нагрев слоя невелик, так как основной перепад температур приходится на газовую прослойку. При этом фронт прогрева потока не распространяется на большую глубину. Расчетный выигрыш по энергозатратам за счет этого иллюстрируется на рис. 2, где видно, что при нагрузке 100 кВт/м^2 на компенсацию теплоты десорбции идет от 60% в верхних сечениях аппарата до $10\text{--}20\%$ в нижнем. С увеличением диаметра частиц псевдооживление слоя угасает. Полезное потребление тепла (площадка под кривыми рис. 2) снижается.

На выходе из слоя частица может иметь температуру ниже равновесной для остаточной степени адсорбции. Этим обусловлена экономия энергоресурсов на регенерацию цеолита.

Значение газовой прослойки находится из [5]

$$\delta = \text{const} \frac{Q\bar{a}(\bar{\epsilon} - 0,5)}{d/2}.$$

Дальнейшие работы проводились с целью создания методики расчета аппаратов с термопсевдооживленным слоем синтетического сорбента. Для этого на основе теоретических исследований [6, 7] были разработаны математические модели сорбционной системы с термопсевдооживленным слоем, в которых в качестве греющей поверхности использованы трубчатые пучки.

Для пучков с плоскими вертикальными трубчатыми нагревателями в замкнутой области получено ($0 \leq X \leq X_0$ и $0 \leq Y \leq Y_0$):

$$-\rho_{\Gamma} \frac{\partial w_{\Gamma}}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial Y} \rho_{\Gamma} D_{\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial Y} - G \frac{\partial a}{\partial X};$$

$$G \frac{\partial a}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial y} \rho_{\Gamma} (1 - \epsilon) D_a \frac{\partial a}{\partial y} - I(1 - \epsilon) \rho_{\Gamma} [a - a_0(T)];$$

$$G (c_{\Gamma} + ac_{\Gamma}) \frac{\partial T}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial y} (c_{\Gamma} + ac_{\Gamma}) \rho_{\Gamma} D_{\Gamma} (1 - \epsilon) \frac{\partial T}{\partial y} + GH(T) \frac{\partial a}{\partial X};$$

$$D_{\epsilon} = D_a = \begin{cases} \text{const} \approx 0 & \text{при } \epsilon < 0,5; \\ 0,013(w - w_0)X_0 \left(\frac{\sqrt{\frac{4I_0 Z_0}{\pi}}}{X} \right)^{0,5} \left(\frac{(w - w_0)^2}{gX} \right)^{-0,15} & \text{при } \epsilon \geq 0,5; \end{cases}$$

$$D_{\Gamma} = \begin{cases} \frac{\lambda_{\Gamma}}{(c_{\Gamma} + ac_{\Gamma})(1 - \epsilon)\rho_{\Gamma}} & \text{при } y < \frac{cQa(\epsilon - 0,5)}{d}; \\ 0,013(w - w_0)X_0 \left(\frac{\sqrt{\frac{4I_0 Z_0}{\pi}}}{X} \right)^{0,15} \left(\frac{(w - w_0)^2}{gX} \right)^{-0,15} & \text{при } y \geq \frac{cQa(\epsilon - 0,5)}{d} \text{ и } \epsilon \geq 0,5; \\ 0,94 \frac{1 + 0,807 \cdot 10^{-2}(\Gamma - 273)}{(c_{\Gamma} + ac_{\Gamma})(1 - \epsilon)\rho_{\Gamma}} \lg \frac{0,74 - 0,31(1 - \epsilon_0)}{0,74 - (1 - \epsilon_0)} & \text{при } \epsilon < 0,5; \end{cases}$$

$$a|_{X=0} = a_0; \quad T|_{X=0} = T_0; \quad \epsilon|_{X=X_0} = 0,4;$$

$$\frac{\partial a}{\partial y} |_{y=y_0} = \frac{\partial T}{\partial y} |_{y=y_0} = \frac{\partial \epsilon}{\partial y} |_{y=y_0} = 0;$$

$$T|_{y=0} = T_{\text{ст}}(X);$$

$$(c_{\Gamma} + ac_{\Gamma}) \rho_{\Gamma} (1 - \epsilon) D_{\Gamma} \frac{\partial T}{\partial y} = -Q(X).$$

Для вертикальных пучков с цилиндрическими трубами в замкнутой области $0 \leq X \leq X_0$ и $r_0 \leq r \leq R_0$:

$$\rho_{\Gamma} w_{\Gamma} \frac{\partial \epsilon}{\partial X} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_{\Gamma} \epsilon D \frac{\partial \epsilon}{\partial r}) - G \frac{\partial a}{\partial X};$$

$$G \frac{\partial a}{\partial X} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r \rho_{\Gamma} (1 - \epsilon) D \frac{\partial a}{\partial r}] + I[a - a(T)] \rho_{\Gamma} (1 - \epsilon);$$

$$(c_{\Gamma} + ac_{\Gamma}) G \frac{\partial T}{\partial X} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r \rho_{\Gamma} (1 - \epsilon)(c_{\Gamma} + ac_{\Gamma})] D \frac{\partial T}{\partial r} + HG \frac{\partial a}{\partial X};$$

$$D = \begin{cases} 0,013(w - w_0)X_0 \left(\sqrt{\frac{4I_0 Z_0}{\pi}} \frac{X}{X} \right)^{0,5} \left(\frac{(w - w_0)^2}{gX} \right)^{-0,15} & \text{при } \epsilon \geq 0,5; \\ 0,94 \frac{1 + 0,807 \cdot 10^{-2} (\Gamma - 273)}{(c_T + ac_\Gamma)(1 - \epsilon)\rho_T} \lg \frac{0,74 - 0,31(1 - \epsilon_0)}{0,74 - (1 - \epsilon_0)} & \text{при } \epsilon < 0,5; \end{cases}$$

$$\Gamma|_{X=0} = T_0; \quad a|_{X=0} = a_0; \quad \epsilon|_{X=X_0} = \epsilon_0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_0} = \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \Big|_{r=R_0} = \frac{\partial a}{\partial r} \Big|_{r=R_0} = \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \frac{\partial a}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = 0;$$

$$\rho_T (1 - \epsilon)(c_T + ac_\Gamma) D \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = Q.$$

Для горизонтальных пучков с цилиндрическими трубами в области $0 \leq U \leq U_0$ и $0 \leq V \leq V_0$:

$$-\rho_\Gamma \frac{w_{\Gamma u}}{g_{11}} \frac{\partial \epsilon}{\partial U} = \frac{1}{g_{11} g_{22}} \frac{\partial}{\partial V} \frac{g_{11} g_{22}}{g_{22} g_{22}} \rho_\Gamma D_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial V} - \frac{G_u}{g_{11}} \frac{\partial a}{\partial U};$$

$$\frac{G_u}{g_{11}} \frac{\partial a}{\partial U} = \frac{1}{g_{11} g_{22}} \frac{\partial}{\partial V} \frac{\partial_{11} \partial_{22}}{g_{22} g_{22}} \rho_T (1 - \epsilon) D_a \frac{\partial a}{\partial V} -$$

$$-I[a - a(T)] \rho_\Gamma (1 - \epsilon);$$

$$\frac{(c_T + ac_\Gamma) G_u}{g_{11}} \frac{\partial T}{\partial U} = \frac{1}{g_{11} g_{22}} \frac{\partial}{\partial V} \frac{g_{11} g_{22}}{g_{22} g_{22}} \rho_\Gamma (1 - \epsilon)(c_T + ac_\Gamma) D_T \frac{\partial T}{\partial V} +$$

$$+ \frac{HG_u}{g_{11}} \frac{\partial a}{\partial U};$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial V} \Big|_{V=0} = \frac{\partial \epsilon}{\partial V} \Big|_{V=V_0} = 0; \quad \frac{\partial a}{\partial V} \Big|_{V=0} = \frac{\partial a}{\partial V} \Big|_{V=V_0} = 0;$$

$$\Gamma|_{V=0} = T_{ст};$$

$$\frac{1}{g_{22}} \rho_T (1 - \epsilon)(c_T + ac_\Gamma) D_T \frac{\partial T}{\partial V} \Big|_{V=0} = 0.$$

На основании результатов численного анализа сделан расчет среднеинтегральной порозности $\bar{\epsilon}$ в сечении на входе цеолита в аппарат. Аппроксимация значений, характеризующих систему в виде полинома, позволила производить оценку параметров, отвечающих началу псевдооживления ($\bar{\epsilon} \geq \epsilon_{кр}$, где $\epsilon_{кр} = 0,5$).

Для аппаратов с вертикальным пучком плоских нагревателей

$$\bar{\epsilon} = 0,0927 - 0,267 \cdot 10^3 d + 2,67a + 0,0626G + 0,99 \cdot 10^{-5} Q -$$

$$\begin{aligned}
& - 0,6133 \cdot 10^6 d^2 - 0,006305 G^2 - 3,547 a^2 - 0,304 \cdot 10^{-10} Q^2 ; \\
\bar{\epsilon} & = 0,262 - 0,934 \cdot 10^3 d + 2,311 a + 0,0399 G + 0,00552 \cdot 10^{-3} Q + \\
& + 1,212 \cdot 10^6 d^2 - 0,00425 \cdot G^2 - 4,778 a^2 - 0,1831 \cdot 10^{-10} Q^2 ; \\
\bar{\epsilon} & = 0,253 - 1,306 \cdot 10^3 d + 4,33 a + 0,164 G + 0,005596 \cdot 10^{-3} Q - \\
& - 6,301 U_a + 0,996 \cdot 10^6 d^2 - 0,0281 G^2 - 16,71 a^2 + 0,428 \cdot 10^{-10} Q^2 .
\end{aligned}$$

При численном исследовании адсорбционных систем с термопсевдоожженным слоем использовались полученные ранее [7] формулы для коэффициента диффузии. Поэтому особое место в работах по изучению свойств адсорбционной системы [5, 7] было отведено кинетике сорбции синтетическими цеолитами группы А. Также было получено вариационное приближение задачи диффузии в сферической частице [3, 7].

Соответственно для цеолитов СаА и MgА .

$$D = 1,42 \cdot 10^{-6} e^{-\frac{29750}{8,314 T}} \quad \text{и} \quad D = 6,47 \cdot 10^{-6} e^{-\frac{36700}{8,314 T}} .$$

Для проверки результатов аналитического исследования, начиная с конца 1975 г., проводится экспериментальное изучение аппаратов, где в качестве сорбента используются цеолиты СаА и MgА. Базируясь на полученных результатах, кафедра промышленной теплоэнергетики БПИ совместно с проектным институтом Гипрохолод выполнила рабочий проект цеха по производству диоксида углерода для реального промышленного внедрения системы с термопсевдоожженным слоем синтетического цеолита.

Вначале для разомкнутого цикла [8]

$$\bar{a} = \frac{\lambda}{d_{\text{нэ}}} n_0 \text{Pe}^{n_1} (d_{\text{нэ}}/d_{\text{чэ}})^{n_2} (1 + 0,01 \text{Па}_0/a_m)^{n_3} ,$$

а затем для замкнутого адсорбционно-десорбционного [9]

$$\begin{aligned}
\text{Nu}_{D,f} & = 9,95 \cdot 10^{-3} \text{Re}_{D,f}^{0,61} (D_{\text{нэ}}/D_{\text{чэ}})^{0,32} (1 + \\
& + \frac{\Delta a}{a_0})^{-1,16} (H/S_{\text{эк}})^{0,59} (\text{Pr}_f/\text{Pr}_m)^{2,89}
\end{aligned}$$

выполняются обширные исследования теплообмена между погруженной поверхностью и синтетическим цеолитом в системе с термопсевдоожженным слоем, а также параметров адсорбционно-десорбционного блока аппарата. Нужно отметить, что получено неплохое согласование результатов аналитического и экспериментального исследования.

Исследование свойств адсорбционной системы с термопсевдоожженным слоем приведено также в [9, 10].

Результаты работы внедрены институтом Гипрохолод при проектировании схем для адсорбционных аппаратов. Практическая апробация проводится Министерством тракторного и сельскохозяйственного машиностроения СССР.

ЛИТЕРАТУРА

1. С е д н и н В.А. Движение твердого адсорбента в двухкомпонентном потоке // Научные и прикладные проблемы энергетики. — Минск, 1976. — Вып. 3. — С. 63–65.
2. С е д н и н В.А. Взаимодействие частиц дисперсного адсорбента двухфазного потока со стенками канала//Деп.: Библиограф. указ. ВИНТИ. М., 1978. — № 8. — С. 67. 3. С е д н и н В.А. Исследование аэродинамики дисперсного адсорбента в процессах тепловой регенерации: Дис. ... канд. техн. наук. — Минск, 1977. — 170 с. 4. С о м о в а С.В., Н е с е н ч у к А.П. Определение изостерической теплоты адсорбции синтетических цеолитов// Научные и прикладные проблемы энергетики. — Минск, 1978. — Вып. 5. — С. 34–43.
5. Ш а т о н Л.В. Тепломассоперенос в технологических установках при термической десорбции твердых сорбентов: Дис. ... канд.техн.наук. — Минск, 1982. — 241 с. 6. Н е с е н ч у к А.П., Ш а т о н Л.В., А н т о н и ш и н а Е.Н., Ш к л я р А.А. Расчет тепло- и массообмена при десорбции в термопсевдооживленном слое цеолита// Изв. вузов СССР. Энергетика. — 1983, — № 12. — С. 72–76. 7. Ш а т о н Л.В., Н е с е н ч у к А.П., А н т о н и ш и н а Е.Н. Исследование диффузии углекислоты в зернах цеолита СаА и МоА // Изв. вузов СССР. Энергетика. — 1982. — № 1. — С. 121–123. 8. Р о м а н ю к В.Н. Интенсификация процессов тепло- и массопереноса и снижение энергозатрат при тепловой регенерации дисперсного адсорбента в промышленных установках: Дис. ... канд.техн.наук. — Минск, 1980, — 324 с. 9. Н е с е н ч у к А.П., В а л у е в А.П., С е д н и н В.А. и др. Экспериментальное исследование внешнего теплообмена при регенерации цеолитов в термопсевдооживленном потоке. — Минск, 1984. — 14 с. — Деп. в ВИНТИ 26.12.84, № 8337-84.
10. Ч е р н ы ш е в и ч В.И. Экспериментальное исследование процесса регенерации синтетических цеолитов при поперечном омывании погруженной поверхности. — Минск, 1984. — 10 с. — Деп. в ВИНТИ 9.1.84, № 260-84.

УДК 536.5:621.643.001.5

Н.Г.ХУТСКАЯ, Ю.А.МАЛЕВИЧ,
канд-ты техн. наук (БПИ)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАПЕЛЬ НА ТЕПЛООБМЕН В ДВУХФАЗНОМ ПОТОКЕ

Рассматривается течение двухфазной воздушно-водяной среды в горизонтальной трубе [1] при следующих условиях: $Re_{см} = 3 \cdot 10^3 - 6 \cdot 10^4$, объемной концентрации $c = 10^{-4}$; диаметре трубы $D = 2,3 \cdot 10^{-2}$ м, диаметре капли $a_k = 100 \cdot 10^{-6}$ м.

Важным параметром, характеризующим двухфазный поток в канале, является соотношение между размером капли и толщиной вязкого подслоя δ_l . Для оценки толщины ламинарного подслоя воспользуемся зависимостью для течения однородной жидкости [2] :

$$\delta_l/D = \frac{32,6}{Re_{см} \sqrt{0,0032 + 0,221 Re_{см}^{-0,237}}} \quad (1)$$

В формуле (1) коэффициент гидродинамического сопротивления определяется в соответствии с зависимостью Никурадзе для однофазного потока, справедливой в рассматриваемом диапазоне чисел Рейнольдса. Используя корреляцию (1), получаем формулу, которая характеризует соотношение диаметра капли и толщины вязкого подслоя: