



On the basis of numerical simulation a common choice of estimated dependencies for definition of dispersion coefficient is made. Simulation is made with account of temperature dependence of dispersion coefficient and of sorbate desorption heat. In the numerical experiment the direct-axis of mixing was not taken into account because horizontal gradients are one degree higher in devices of such type than in vertical ones.

А. П. НЕСЕНЧУК, В. М. КОПКО,
Т. В. РЫЖОВА, М. Г. ПШОНИК, Н. Г. МАЛЬКЕВИЧ, БГА

К РАСЧЕТУ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ СОРБЕНТА В СИСТЕМЕ ОЧИСТКИ ИСКУССТВЕННЫХ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ ОТ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

УДК 628.26.(075.8)

Наиболее уязвимым местом численной модели [1], а также модели тепло- и массопереноса для сферической частицы сорбента

$$\frac{da}{dt} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left[r^2 D \exp\left(-\frac{E_0}{RT}\right) \frac{da}{dr} \right], \quad (1)$$

$$\rho_T c_T \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left[r^2 \lambda_T + \frac{dT}{dr} + \rho_T H_a \frac{da}{dr} \right], \quad (2)$$

$$a_{t=0} = a_0, \quad T_{t=0} = T_0, \quad (3)$$

$$a_{r=0} = 0, \quad \left(\frac{da}{dr}\right)_{r=0} = 0, \quad \left(\frac{dT}{dr}\right)_{r=0} = 0, \quad (4)$$

$$T_{r=r_0} = T_H \quad \text{при } 0 = t \leq t_H,$$

$$T_{r=r_0} = T_0 \quad \text{при } 0 = t > t_H$$

является ошибка в оценке коэффициента перемешивания.

В (1)–(4) учитываются температурная зависимость коэффициента диффузии и теплота десорбции. Влиянием термодиффузионной составляющей коэффициента теплопроводности пренебрегаем, так как она намного меньше теплопроводности кристаллической решетки сферической частицы.

В некоторых случаях погрешность коэффициента переноса в несколько процентов дает разброс численных результатов в десятки процентов, что сводит на нет ценность численной модели. Поэтому в данной работе проведено исследование влияния коэффициента перемешивания на результаты расчета профилей температур, адсорбции и порозности.

При численном моделировании процессов тепло- и массопереноса большое значение имеет выбор зависимости коэффициента перемешивания твердой фазы от скорости псевдоожижающего агента. Причем ключевую роль играет как абсолютное значение коэффициента перемешивания твердой фазы, через который определяется эффективный коэффициент теплопроводности псевдоожиженного

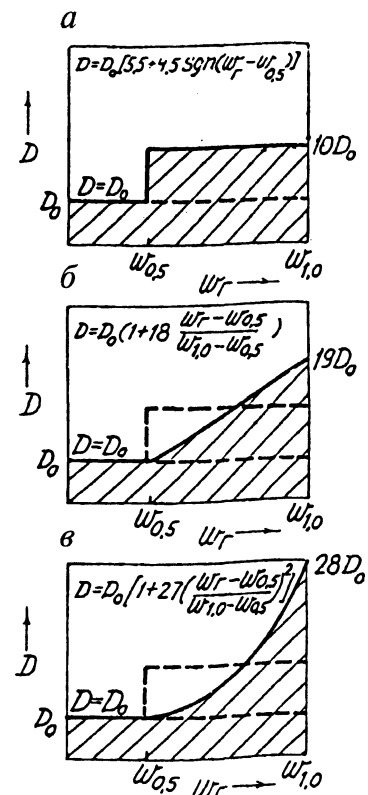


Рис. 1. Зависимость $D = f(W_r)$; а–в соответственно для ступенчатой, линейной и параболической зависимости D от W_r

слоя (для моделирования в приближении сплошной среды), так и закон изменения коэффициента перемешивания от скорости газовой фазы, точное значение его первой и второй производных. Известно несколько экспериментальных корреляций, описывающих коэффициент перемешивания через скорость газовой фазы [2—5]. Эти корреляции достаточно точно совпадают по величине, однако различаются по виду функций, применяемых для аппроксимации экспериментальных данных, что приводит к значительным разбегам в значениях низших производных коэффициента перемешивания от скорости газовой фазы.

Авторами выполнен численный эксперимент при ступенчатой, линейной и параболической зависимостях коэффициента перемешивания от скорости газовой фазы (рис. 1).

Ниже приводится численный эксперимент при ступенчатой, линейной и параболической зависимостях коэффициента перемешивания от скорости псевдоожижающего газа (рис. 1). Во всех случаях принималось, что при $\epsilon < 0,5$ теплопроводность слоя описывается выражением $\lambda = \rho_r c_r (1-\epsilon)D$ с эквивалентным коэффициентом перемешивания $D = D_0$. При $\epsilon \geq 0,5$ D изменяется в зависимости от скорости газовой фазы W_r , причем коэффициенты в соответствующих формулах выбирались так, что площадь под кривой $D(W_r)$ оставалась постоянной. Термопсевдоожиженный поток характерен тем, что псевдоожижение происходит под действием выделяющегося в слое при нагреве газообразного сорбата (в данном случае диоксида углерода). При этом скорость псевдоожижения и соответственно порозность имеют наибольшее значение вблизи источника теплопритока и резко падают при продвижении в глубь слоя. Именно в такой системе наиболее рельефно проявляется нелинейность зависимости D от скорости псевдоожижения W_r .

Сопоставление выполнялось по данным решения модели тепло- и массопереноса в системе с единичным горизонтальным цилиндром и сферой методом конечных разностей. Корректность программы была проверена на задаче обтекания сферы и цилиндра идеальной жидкостью. На рис. 2 показаны двумерные профили температур для коэффициентов перемешивания, представленных рис. 1. Как видно из рисунка, форма изотерм 293, 320, 350 и 400 К значительно изменяется при переходе от постоянного коэффициента перемешивания D_0 к изменяющемуся $D(W_r)$.

Значения средних по поверхности нагревателя температур, разности средней степени адсорбции по нижнему и верхнему (горизонтальным) сечениям, средней в верхнем сечении порозности и коэффициентов теплообмена приведены в таблице. По данным таблицы можно сделать вывод, что рассчитанная эффективность регенерации сорбента на единичном цилиндрическом нагревателе будет на 2,2 и

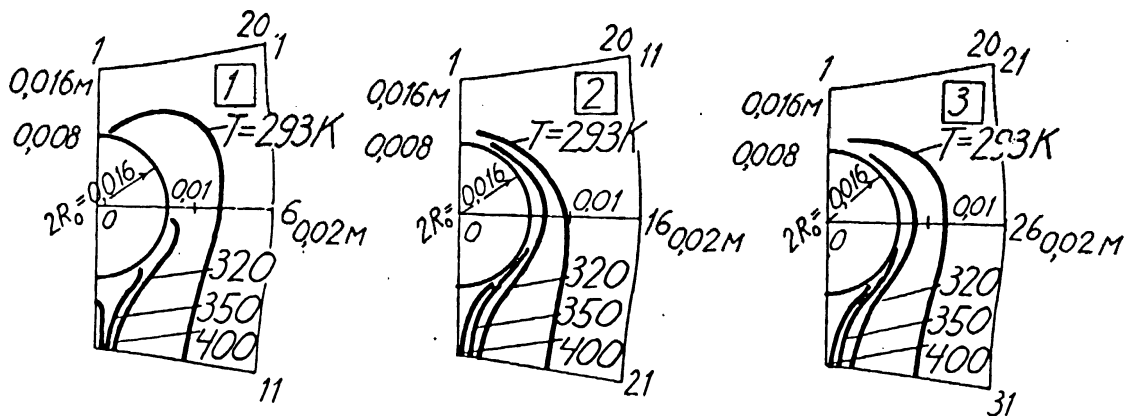


Рис. 2. Двухмерные профили температуры слоя (базовый вариант $a_0 = 13$ мас.%; $T_0 = 293$ К; $Q = 30 \cdot 10^3$ Вт/м²; 1—3 — соответственно

для ступенчатой, $D = 10D_0$; линейной $D = D_0 \left(1 + 18 \frac{W_0 - W_{0,5}}{W_1 - W_{0,5}}\right)$ и параболической $D = D_0 \left[1 + 27 \left(\frac{W_0 - W_{0,5}}{W_1 - W_{0,5}}\right)^2\right]$ зависимостей D от W_r

Значения средних характеристик слоя

Выражение для коэффициента перемешивания при $\epsilon \geq 0,5$	$\bar{T}_{нагр}$, К	$\Delta \bar{A}$, мас.%	$\bar{\epsilon}$	$\bar{\alpha}$, Вт/(м ² ·К)
$D = 10D_0$	436	1,80	0,488	209,8
$D = D_0 \left(1 + 18 \frac{W_0 - W_{0,5}}{W_1 - W_{0,5}}\right)$	504	1,76	0,478	142,2
$D = D_0 \left[1 + 27 \left(\frac{W_0 - W_{0,5}}{W_1 - W_{0,5}}\right)^2\right]$	551	1,73	0,476	116,3

4,0% меньше соответственно в случае линейной и параболической зависимости коэффициента перемешивания от скорости газовой фазы по сравнению с постоянным коэффициентом перемешивания в термопсевдооживленном слое. Учитывая, что в реальном термическом десорбере применяется шесть и более рядов нагревателей, то погрешность расчета может составить несколько десятков процентов. Последнее указывает на исключительную важность выбора не только эффективного значения коэффициента перемешивания, но и характера его зависимости от скорости W_r .

Выбор расчетной формулы для оценки $D_{эф}$ проводили путем анализа данных численного решения модели тепло- и массопереноса в системе с термопсевдооживлением при использовании формул [2—5].

Коэффициент перемешивания $D_{эф}$ в теории переноса является эмпирическим параметром, причем достаточно трудно определяемым в эксперименте. При этом известно, что в псевдооживленном потоке он не постоянен во времени, существенно зависит как от легко определяемых параметров (диаметр частиц, их плотность, скорость газа и т. д.), так и менее определенных (форма частиц, их шероховатость и др.). Такая зависимость приводит к разбросу экспериментальных данных по коэффициенту перемешивания. Опубликованные в литературе результаты исследований отличаются в качественном и количественном отношении.

К сожалению, подавляющее большинство измерений в псевдооживленных слоях связано с оценкой коэффициента теплообмена с погруженной поверхностью. Что же касается коэффициента перемешивания, то опубликованных зависимостей гораздо меньше. Нами были использованы:

зависимость Теплицкого и Тамарина [2]

$$D = \begin{cases} 0,13(W - W_0)X_0 \left(\frac{4Y_0 Z_0 / \pi}{X} \right)^{0,5} \left[\frac{(W - W_0)^2}{gX} \right]^{-0,15} & \text{при } \varepsilon \geq 0,5, \\ 0,94 \frac{1 + 0,807 \cdot 10^{-2}(T - 273)}{(c_r = ac_r)(1 - \varepsilon)\rho_r} \lg \frac{0,74 - 0,31(1 - \varepsilon)}{0,74 - (0,74 - (1 - \varepsilon_0))} & \text{при } \varepsilon < 0,5; \end{cases} \quad (5)$$

зависимость Бородули [3]

$$a_{эф} = 1,4v \left(\frac{W}{W_k} - 1 \right)^{0,35} A_r^{0,12} \left(\frac{H}{D} \right)^{0,05}, \quad (6)$$

где $a_{эф} = \lambda_{эф} / (c_r \rho_r (1 - \varepsilon))$;

зависимость Вике, Травинского [5]

$$D = 2,76 \cdot 10^{-2} W d^{0,85}. \quad (7)$$

В численном эксперименте исследовался аппарат с горизонтальным пучком цилиндрических труб диаметром 0,08 м и расстоянием в осях между вертикальными рядами 0,035 м. Синтетический цеолит СаА с размером зерен $0,15 \cdot 10^{-3}$ м при температуре 293 К и начальной адсорбции диоксида углерода 13 мас.% перемещался в межтрубном пространстве с расходом 2,2 кг/(м²·с). Подвод теплоты к падающему дисперсному потоку цеолита составлял $30 \cdot 10^3$ Вт/м².

Нужно заметить, что основной вклад в изменение коэффициента перемешивания в термопсевдооживленном потоке цеолита вносит, как уже отмечалось, скорость псевдооживляющего агента, которым является диоксид углерода, выделяющийся из сорбента при нагреве. По степени зависимости коэффициента перемешивания от скорости формулы (5)—(7) располагаются в следующем порядке:

$$\begin{array}{ll} \text{Вике, Травинского (7)} & D_{эф} \sim W_r^2; \\ \text{Теплицкого, Тамарина (5)} & D_{эф} \sim W_r^{0,7}; \\ \text{Бородули (6)} & D_{эф} \sim W_r^{0,35}. \end{array}$$

Однако, как следует из рис. 2 (двухмерные профили T), большую теплопроводность имеет поток, описываемый формулой (5), затем (6) и, наконец, (7). Из рисунка также видно, что более сильная зависимость $D_{эф}(W)$ в формуле (7) приводит к локализации области расширения потока ближе к трубкам пучка. Естественно, что более равномерная тепловая обработка материала обеспечивает лучшую регенерацию сорбента. Вместе с тем при рассмотрении среднеинтегральных величин адсорбции, температуры сорбента и порозности видно, что разброс данных при использовании (5)—(7) не превышает 20 %. Поэтому выбор зависимости $D_{эф}(W)$ для применения в расчетах не имеет большого значения. Численные эксперименты также показали, что если использовать зависимость

$$D_{эф} = \frac{1}{W_B - W_0} \int_{W_0}^{W_B} D_{эф}(W) dW,$$

где интегрирование ведется от скорости начала псевдооживления W_0 до скорости витания W_B , то разброс расчетных значений не превышает нескольких процентов.

В численном эксперименте продольная составляющая перемешивания не учитывалась в связи с тем, что в аппарате с термопсевдооживленным слоем вертикальные градиенты на порядок ниже горизонтальных. Доминирующую роль в процессах переноса играет не продольное перемешивание, а вертикальные конвективные потоки газовой и твердой фаз. Для подтверждения сказанного был выполнен ряд расчетов на модели, учитывающей продольное перемешивание. Серия расчетов на ЭВМ показала, что введение в уравнения термопсевдооживленного слоя продольных составляющих перемешивания нецелесообразно, так как дает поправку, не превышающую 5 % при значительном увеличении времени счета.

Сказанное позволило остановить выбор на формуле Теплицкого и Тамарина. Все дальнейшие расчеты по моделям [1] выполнены с применением формулы (5).

Из изложенного выше можно сделать вывод, что разработанная модель [1] достаточно устойчива к погрешности эмпирических зависимостей, положенных в ее основу. Коэффициент перемешивания существенно влияет лишь на уровне первой производной по скорости газового потока. Более высокие производные не оказывают значительного влияния на параметры термопсевдооживленного потока.

Литература

1. Несенчук А. П., Тимошпольский В. И., Трусова И. А. и др. Энергоэкологические аспекты целесообразности очистки доменного газа перед его сжиганием в нагревательных печах металлургических переделов // *Литье и металлургия*. 1999. № 1. С. 41—44.
2. Бородуля В. А., Теплицкий Ю. С., Ганжа В. Л., Юпанов Ю. Г. Теплообмен вертикального цилиндра с продувным плотным слоем // *Проблемы теплопереноса в теплоэнергетических установках с дисперсными системами*. Мн., 1985. С. 59—67.
3. Бородуля В. А., Коминский В. И. О пакетной модели внешнего теплообмена псевдооживленных систем // *ИФЖ*. 1984. Т. 47, № 5. С. 789—796.
4. Забродский С. С., Бородуля В. А., Ганжа В. Л. и др. К вопросу о механизме теплообмена псевдооживленного слоя со стенкой // *Весті АН БССР. Сер. фіз.-энерг. навук*. 1973. № 3. С. 103—107.
5. Wiche E., Trawinski U. Uber die vermisch und des Stromund-medium in flussegekeits uirbelschten // *Chem. I ng. Techn.* 1954. Vol. 25, N 3. P. 114—124.

14 февраля 1976 г.

цех алюминиевого литья

**Осиповичского завода автомобильных агрегатов
дал Первую промышленную плавку.**

**Поздравляем коллектив цеха
с профессиональным праздником —
25-летием Первой плавки.**

Плавить больше, плавить лучше.

БелОлиМ
Редколлегия