

## ТРАНСПОРТ ЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА ЧЕРЕЗ ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ РЕШЕТКУ ПРИ НАЛИЧИИ ПРОТИВОТОКА ГАЗА

УДК 66.096.5

Г. Г. Кувшинов

Институт катализа СО РАН, 630090 Новосибирск

**1. Введение.** В настоящей работе рассматривается вопрос о транспорте зернистого материала через горизонтальную решетку из плотного или псевдооживленного слоя в свободное пространство при наличии противотока газа. Этот вопрос имеет как практическое, так и теоретическое значение. На практике рассматриваемый процесс реализуется в аппаратах с движущимся и псевдооживленным слоями [1, 2], в секционирующих элементах, в узлах распределения дисперсного материала и газа и др. С теоретической точки зрения данная проблема интересна тем, что ее решение лежит в основе понимания закономерностей циркуляции дисперсного материала и теплопереноса через секционирующий элемент в условиях, когда псевдооживленный слой существует как над решеткой, так и под решеткой.

Вопрос о транспорте частиц через горизонтальную провальную решетку рассматривался лишь в нескольких экспериментальных работах [3–5].

На основе опубликованных данных можно отметить ряд особенностей процесса прохождения частиц через решетку из верхней секции в свободное подрешеточное пространство.

1. В отсутствие протока газа каждое отверстие решетки функционирует как одиночное, а суммарный расход дисперсного материала через решетку определяется суммированием одинаковых расходов по всем отверстиям.

2. С увеличением скорости газа расход дисперсного материала через решетку уменьшается.

3. Предельная усредненная по всем отверстиям скорость газа, при которой прекращается истечение дисперсного материала, существенно превышает предельную скорость газа в случае одиночного отверстия.

Наряду с отмеченными общими особенностями экспериментальные данные [4, 5] содержат и принципиальные качественные противоречия. В частности, в [4] отмечается зависимость предельной скорости газа от диаметра и плотности частиц, а в [5] такой зависимости не обнаружено. В то же время в [5] отмечена зависимость скорости истечения дисперсного материала от высоты псевдооживленного слоя на решетке, хотя в [4] этого обнаружено не было.

Указанные противоречия позволяют заключить, что результаты [4, 5] не являются бесспорными; ими сложно воспользоваться еще и потому, что в [4], например, не представлены первичные данные, а предлагаемые эмпирические соотношения дают противоречащие здравому смыслу значения величин (например, расчетная предельная скорость газа для частиц  $d_s = 1$  мм составляет 113 м/с).

С другой стороны, в [5], хотя и представлены первичные результаты, однако величины расхода твердого материала через решетку, указанные на графиках, видимо, ошибочны, так как нет соответствия для одних и тех же условий между данными на различных рисунках.

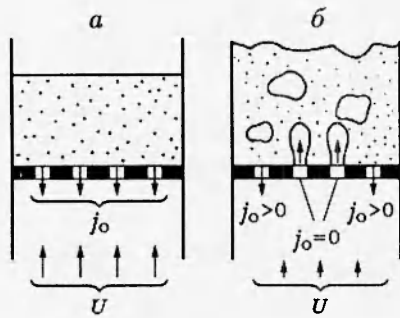


Рис. 1

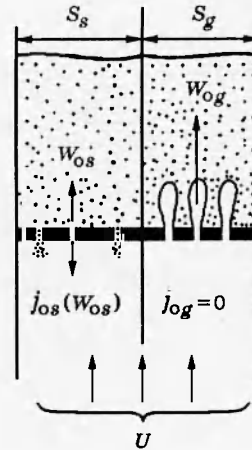


Рис. 2

Необходимо отметить также, что механизм и физические особенности истечения зернистого материала через решетку при наличии противотока газа в литературе не рассматривались.

В настоящей работе представлена физическая модель исследуемого процесса, на основе которой развита приближенная теория истечения зернистого материала, позволившая получить соотношения для расчета расхода дисперсного материала и предельной скорости газа, не содержащие новых эмпирических констант.

**2. Истечение зернистого материала при малых скоростях газа.** Анализ опубликованных данных и экспериментальных результатов настоящей работы позволяет выделить два основных режима течения зернистого материала через решетку: режим плотного слоя, соответствующий малым скоростям газа (рис. 1, а), и режим псевдооживленного слоя, отвечающий большим скоростям газа, при которых происходит псевдооживление дисперсного материала на провальной решетке (рис. 1, б).

Рассматриваются секционирующие решетки или сетки с одинаковыми, равномерно расположенными отверстиями. Течение зернистого материала через такие решетки в режиме плотного слоя характеризуется равномерным распределением газа между отверстиями. При этом расход зернистого материала  $j_o$  в каждом отверстии будет одинаков, подобно тому, как это имеет место в случае, когда расход газа через решетку равен нулю [4].

При равномерном распределении потока газа и частиц по отверстиям суммарный расход частиц на единицу площади решетки можно выразить в виде

$$j = j_{os}\varphi, \quad (2.1)$$

где  $j_{os} = j_o/S_o$  — массовый поток частиц на единицу площади отверстия ( $S_o$  — площадь отверстия). Величина  $j_{os}$  может быть определена на основе соотношения для одиночного отверстия в условиях противотока газа и частиц [6, 7]:

$$j_{os} = K \rho_d \left( \frac{(\pi d_s^3 \rho_s g - 6F_g) d_o}{\pi d_s^3 \rho_s} \right)^{1/2} (1 - d_s/d_o)^{5/2}. \quad (2.2)$$

Здесь и ниже

$$K = \frac{4((1 - \varepsilon)/3)^{3/2}/(1 - \varepsilon_0)}{\ln(\exp(3(2 - 2^{1/2})(1 - \varepsilon)/2) - \exp(3(2 - 2^{1/2})(1 - \varepsilon) - 1)^{1/2})};$$

$$F_g = 12,5 \pi (1 - \varepsilon) d_s \rho_g \nu_g W_0 / \varepsilon^3 + 7,29 \cdot 10^{-2} \pi d_s^2 \rho_g W_0^2 / \varepsilon^3; \quad W_0 = U/\varphi;$$

$\rho_g, \rho_d, \rho_s$  — плотность газа, неподвижного слоя и частиц ( $\rho_d = (1 - \varepsilon_0)\rho_s$ );  $\varepsilon_0, \varepsilon$  — порозность неподвижного слоя и свода;  $d_s, d_0$  — диаметр частицы и отверстия;  $\nu_g$  — кинематическая вязкость газа;  $U, W_0$  — скорость газа перед решеткой и в отверстии;  $\varphi$  — относительное свободное сечение решетки.

Очевидно, что формула (2.1) должна быть справедлива в диапазоне скоростей газа, не превышающих предельную скорость  $U_1$ , выше которой режим истечения не является равномерным.

Действительно, при сохранении равномерного распределения газа между отверстиями течение зернистого материала должно прекратиться при скорости газа в аппарате  $U = W_{oc}\varphi$ , где  $W_{oc}$  — критическая скорость газа в одиночном отверстии, соотношение для расчета которой имеет вид [6, 7]

$$W_{oc} = \frac{4Ar \nu_g / d_s}{150(1 - \varepsilon)/\varepsilon^3 + ((150(1 - \varepsilon)/\varepsilon^3)^2 + 4Ar 1,75/\varepsilon^3)^{1/2}} \quad (2.3)$$

( $Ar = d_s^3 \rho_s g / (\rho_g \nu_g^2)$ ) — число Архимеда). Однако этого, как было отмечено выше, не происходит. Поток частиц через решетку прекращается при средних скоростях газа  $\bar{U}_2$ , многократно превышающих значение  $W_{oc}\varphi$ , что указывает на особый механизм истечения дисперсного материала через решетку в условиях повышенных скоростей газа, связанный с неравномерной работой отверстий.

**3. Транспорт зернистого материала при  $U > U_1$ . Физическая модель.** Наблюдаемое на практике течение зернистого материала через решетку при скоростях газа, превышающих  $W_{oc}\varphi$ , можно объяснить, предположив, что при повышенных скоростях газа, начиная с некоторой скорости  $U_1$ , происходит перераспределение газа между отверстиями.

Схематично распределение потоков газа и частиц показано на рис. 2, где  $S_s, S_g$  — доли отверстий типа  $s$  и  $g$ ;  $W_{os}, W_{og}, j_{os}, j_{og}$  — средние скорости газа и плотности потока частиц в отверстиях  $s$  и  $g$  соответственно. Предполагается, что на решетке существуют лишь два типа отверстий  $g$  и  $s$  с характерными скоростями газа в отверстиях  $W_{og}$  и  $W_{os}$ , причем  $W_{og} > W_{oc}, W_{os} < W_{oc}$ . Очевидно, что в этом случае отверстия  $g$  заблокированы потоком газа ( $j_{og} = 0$ ), а отверстия  $s$  не заблокированы ( $j_{os} > 0$ ). При этом средняя скорость газа в отверстиях  $s$  и  $g$  может быть выше  $W_{oc}$ , и в то же время зернистый материал благодаря отверстиям  $s$  будет транспортироваться через решетку из верхней секции в нижнюю. Такое перераспределение газа вполне возможно в случае образования газовых пузырей на решетке (при наличии псевдооживленного слоя над решеткой).

Действительно, в отсутствие газовых пузырей при заданном перепаде давления на решетке скорость газа в отверстии в значительной мере определяется гидравлическим сопротивлением, связанным с истечением газа в плотную засыпку. При образовании на отверстии пузыря (переходе отверстия  $s$  в  $g$ ) это сопротивление резко уменьшается, благодаря чему скорость газа в данном отверстии возрастает, а в отверстиях типа  $s$  уменьшается. При дальнейшем увеличении подачи газа под решетку произойдет образование газовых пузырей на дополнительных отверстиях, имеющих наименьшее гидравлическое сопротивление и наибольшую скорость газа.

Таким образом, с увеличением скорости газа доля отверстий  $s$  будет уменьшаться, а доля отверстий  $g$  — возрастать. В случае, когда  $a \ll H_b$  ( $a$  — расстояние между смежными отверстиями,  $H_b$  — высота слоя), такими отверстиями могут быть отверстия  $s$ , ближайшие к отверстиям  $g$  (смежные с отверстиями  $g$ ). Если  $a \simeq \bar{H}_b$ , то в первую очередь смена режима будет происходить на отверстиях, высота слоя над которыми минимальна. Ниже рассматривается случай  $a \ll H_b$ .

Исходя из изложенного, можно принять, что физический механизм транспорта частиц при наличии псевдооживленного слоя на решетке ( $U > U_1$ ) состоит в следующем:

- благодаря образованию газовых пузырей на решетке происходит перераспределение потока газа между отверстиями;
- существует два основных типа отверстий: пропускающие частицы (малые скорости газа, отверстия  $s$ ) и не пропускающие частицы (большие скорости газа, отверстия  $g$ );
- скорость газа в отверстиях определяется их гидравлическим сопротивлением, включающим составляющую, которая связана с распределением дисперсного материала над отверстием;
- расход дисперсного материала через решетку определяется плотностью потока частиц  $\dot{J}_{os}(W_{os})$  из отверстий  $s$  и долей этих отверстий  $S_s$  на решетке при заданной скорости газа;
- скорость газа  $U_1$ , при которой происходит переход от равномерной работы отверстий к неравномерной, должна соответствовать максимальной скорости, при которой  $S_s = 1$ ;
- предельная скорость газа  $U_2$ , при которой течение зернистого материала прекращается, отвечает условию перехода всех отверстий решетки в режим  $g$ , т. е.  $S_g = 1$ ;
- в диапазоне скоростей  $U_1 \div U_2$  работа каждого отверстия характеризуется периодической сменой указанных режимов, в то время как суммарное количество отверстий каждого типа при постоянной скорости газа остается неизменным.

В рамках предложенной модели основными проблемами расчета расхода дисперсного материала через решетку и предельных скоростей газа  $U_1$  и  $U_2$  являются вопросы определения скоростей газа в отверстиях и числа отверстий каждого типа при заданной скорости газа в аппарате. В свою очередь, эти характеристики в существенной мере зависят от перепада давления на решетке.

*Падение давления на решетке.* Качественная картина распределения давления газа вблизи решетки показана на рис. 3, где кривая 1 и поверхность пузыря являются изобарами, соответствующими давлению газа в пузыре  $P_b$ . Обозначим давление газа под решеткой  $P_p$ . Необходимо найти перепад давления:

$$\Delta P = P_p - P_b.$$

Рассмотрев течение газа через отверстие  $s$ , получим

$$\Delta P = \Delta P_{ps} + \Delta P_{ss}.$$

Здесь  $\Delta P_{ps}$  — падение давления непосредственно на отверстии  $s$ ;  $\Delta P_{ss}$  — перепад в засыпке на отрезке  $x$  от отверстия до изобары 1. Полагая, что  $W_{os} \ll W_{og}$ , имеем  $\Delta P_{ps} \ll \Delta P_{ss}$  и

$$\Delta P \approx \Delta P_{ss}. \quad (3.1)$$

Используя представления о формировании над отверстием динамического свода частиц радиусом  $r_o - r_s$  ( $r_o, r_s$  — радиусы отверстия и частицы) [6, 7] при истечении дисперсного материала из одиночного отверстия, величину  $\Delta P_{ss}$  для  $H_b \gg a$  можно оценить

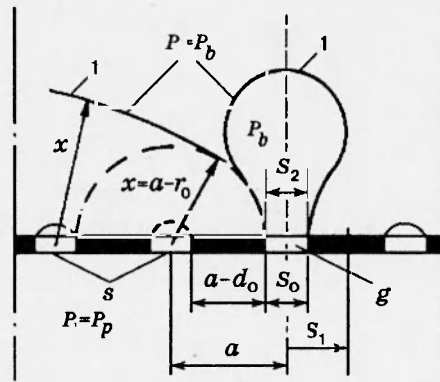


Рис. 3

на основе соотношения

$$\Delta P_{ss} \simeq \Delta P(x) = \int_{r_0 - r_s}^x P_e(x) dx, \quad (3.2)$$

где  $P_e(x)$  — перепад давления на единицу высоты засыпки, определяемый на основе уравнения Эргана [8]:

$$P_e(x) = A_1 U_s(x) + B_1 U_s^2(x). \quad (3.3)$$

Здесь

$$A_1 = 150 \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3 d_s^2} \rho_g \nu_g, \quad B_1 = 1,75 \frac{1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_0^3 d_s^2} \frac{\rho g}{d_s} \quad (3.4)$$

( $U_s$  — скорость фильтрации в рассматриваемой точке).

Считая течение газа вблизи отверстия  $s$  сферически-симметричным, получим

$$U_s(x) = W_{os} r_0^2 / (2x^2).$$

После интегрирования (3.2) с учетом (3.3), (3.4) имеем

$$\Delta P(x) = A_1 \frac{W_{os} r_0^2}{2} \left( \frac{1}{r_0 - r_s} - \frac{1}{x} \right) + B_1 \frac{W_{os}^2 r_0^4}{12} \left( \frac{1}{(r_0 - r_s)^3} - \frac{1}{x^3} \right). \quad (3.5)$$

Чтобы определить  $\Delta P_{ss} = \Delta P(x)$ , необходимо знать величины  $W_{os}$  и  $x$  хотя бы для одного отверстия  $s$ . Их можно найти на основе физических соображений, если учесть следующее. В стационарных условиях количество отверстий каждого типа на решетке остается постоянным. В то же время характер работы каждого отверстия, как показывают наблюдения, является периодическим. С течением времени происходит периодическая смена режимов работы отверстий: на одних режим работы изменяется от  $g$  к  $s$ , на других — наоборот. Это говорит о том, что в каждый момент времени существуют отверстия  $s$ , находящиеся в критическом состоянии, т. е. отверстия, скорость газа в которых равна критической скорости газа  $W_{oc}$ , определяемой соотношением (2.3). Эта скорость является максимально возможной для отверстий  $s$ .

С другой стороны, поскольку для всех отверстий  $\Delta P_{ss} \simeq idem$ , то в случае  $H_b \gg a$ , как следует из (3.5), максимальная скорость газа должна реализовываться в отверстиях, для которых значение  $x$  минимально. Очевидно (рис. 3), минимальными значениями  $x$  будут характеризоваться отверстия  $s$ , смежные с отверстиями  $g$ . Для смежных отверстий  $s$  можно принять  $x = a - r_0$ . Таким образом, принимая, что для отверстий  $s$ , примыкающих

к отверстиям  $g$ ,  $x = a - r_o$ , а  $W_{os} = W_{oc}$ , и подставляя эти значения в (3.5), получим уравнение для перепада давления на решетке:

$$\Delta P = \Delta P_{ss} = A_1 \frac{W_{oc} r_o^2}{2} \left( \frac{1}{r_o - r_s} - \frac{1}{a - r_o} \right) + B_1 \frac{W_{oc}^2 r_o^4}{12} \left( \frac{1}{(r_o - r_s)^3} - \frac{1}{(a - r_o)^3} \right). \quad (3.6)$$

*Характерная скорость газа в отверстиях  $s$ .* Выше было принято, что для отверстий  $s$ , смежных с  $g$ , скорость газа  $W_{os}$  равна  $W_{oc}$ . Однако таких отверстий должно быть относительно немного, так как на практике отверстия  $g$  и  $s$  в каждый момент времени распределены по решетке неравномерно. Имеется тенденция к образованию сплошных участков, содержащих отверстия только одного типа. В этих условиях для большинства отверстий  $s$  можно принять  $x \gg a$ . С учетом данного условия (3.5) перепишем в виде

$$\Delta P(x) = A_1 \frac{W_{os} r_o^2}{2} \left( \frac{1}{r_o - r_s} \right) + B_1 \frac{W_{os}^2 r_o^4}{12} \frac{1}{(r_o - r_s)^3}.$$

Отсюда с учетом (3.1) находим

$$W_{os} = \frac{-A_1/2 + (A_1^2/4 + \Delta P_{ss} B_1 / (3(r_o - r_s)))^{1/2}}{B_1 r_o^2 / (6(r_o - r_s)^2)},$$

где  $\Delta P_{ss}$  определяется соотношением (3.6).

*Скорость газа в отверстиях  $g$ .* Для отверстий  $g$  выражение для рассматриваемого перепада давления имеет вид

$$\Delta P = P_p - P_b = \Delta P_g = \zeta_g \frac{\rho_g W_{og}^2}{2}.$$

Здесь  $\zeta_g$  — коэффициент гидравлического сопротивления, зависящий от организации входа и выхода газа из отверстия [9].

В частности, в случае плоской решетки (рис. 3) отверстие можно рассматривать как диафрагму, для которой отношение площадей сечения отверстия и входного сечения  $S_o/S_1 = \varphi$ , а отношение площади отверстия к выходному сечению  $S_o/S_2 = 1$ , поскольку пространство вне пузыря над решеткой заполнено частицами. При известных значениях  $S_o/S_1$  и  $S_o/S_2$  величину  $\zeta_g$  можно определять по соответствующим таблицам (см., например, [9, с. 196]).

Учитывая, что  $\Delta P_g = \Delta P = \Delta P_{ss}$ , выражение для  $W_{og}$  получим в виде

$$W_{og} = \left( \frac{2\Delta P_{ss}}{\zeta_g \rho_g} \right)^{1/2}.$$

*Доли отверстий  $s$  и  $g$ .* Так как на решетке существуют два типа отверстий, то

$$S_s + S_g = 1. \quad (3.7)$$

С другой стороны, зная скорости газа в отверстиях каждого типа, запишем уравнение баланса расхода газа:

$$S_s W_{os} + S_g W_{og} = U/\varphi. \quad (3.8)$$

Решая (3.7) и (3.8) совместно, находим

$$S_s = \frac{W_{og} - U/\varphi}{W_{og} - W_{os}}, \quad (3.9)$$

$$S_g = \frac{U/\varphi - W_{os}}{W_{og} - W_{os}}. \quad (3.10)$$

*Расход зернистого материала через решетку.* Поскольку расход зернистого материала через одиночное отверстие слабо зависит от высоты и загроможденности плотного слоя над отверстием (если только высота свободного плотного слоя над отверстием превышает его диаметр), можно полагать, что закономерности истечения дисперсного материала через одиночное отверстие [6, 7] и отверстия  $s$  одинаковы. При этом расход через решетку определяется суммированием расходов по всем отверстиям  $s$ . Зная скорость  $W_{os}$  в отверстии  $s$ , расход частиц на единицу площади этого отверстия  $j_{os}(W_{os})$  определим на основании соотношения (2.2), подставляя вместо  $W_o$  величину  $W_{os}$ . В этом случае суммарный поток частиц на единицу площади решетки

$$j = j_{os}(W_{os}) \varphi S_s = j_{os}(W_{os}) \varphi \left( \frac{W_{og} - U/\varphi}{W_{og} - W_{os}} \right). \quad (3.11)$$

*Предельные скорости газа  $U_1$  и  $U_2$ .* Скорость газа  $U_1$ , при которой происходит смена режима истечения на решетке, соответствует максимальной скорости, при которой  $S_s = 1$ . Эту величину получим, подставив в правую часть (3.9) вместо  $U$  значение  $U_1$  и положив левую часть равной единице:

$$U_1 = W_{os} \varphi.$$

Предельная скорость газа, при которой прекращается транспорт частиц через решетку, находится, если в (3.10) положить  $S_g = 1$  или в (3.11)  $j = 0$ . При этом имеем (заменяв  $U$  на  $U_2$ )

$$U_2 = W_{og} \varphi = \varphi \left( \frac{2\Delta P_{ss}}{\zeta_g \rho_g} \right)^{1/2}.$$

**4. Анализ полученных результатов.** Из анализа полученных расчетных соотношений видно, что величина потока зернистого материала через решетку и критическая скорость газа, при которой истечение частиц прекращается, зависят от большого числа параметров: вязкости газа, плотности газа и частиц, диаметров отверстия и частиц, живого сечения решетки и гидравлического сопротивления отверстия.

На рис. 4 показаны расчетные кривые, отражающие влияние скорости газа и диаметра частиц на расход зернистого материала через решетку. Видно, что с увеличением скорости газа скорость истечения зернистого материала снижается. С уменьшением диаметра

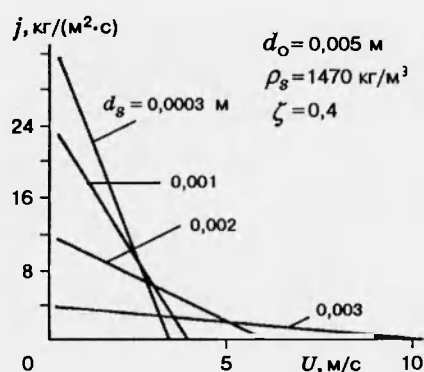


Рис. 4

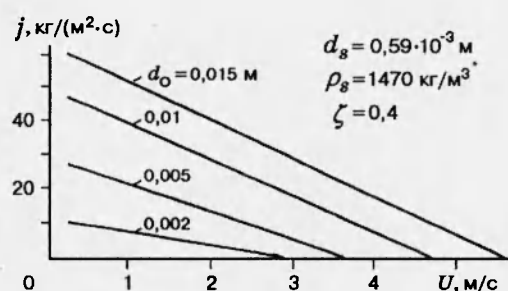


Рис. 5

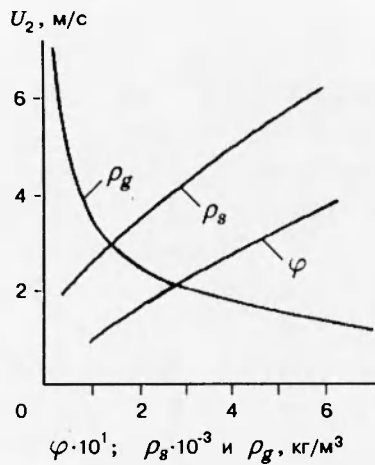


Рис. 6

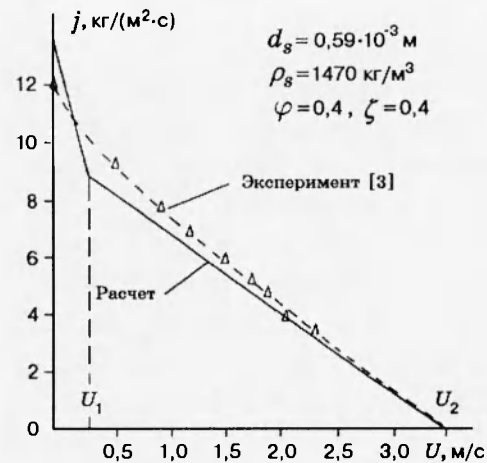


Рис. 7

частиц скорость истечения при низких скоростях газа возрастает, но при этом предельная скорость газа  $U_2$ , при которой истечение зернистого материала через решетку прекращается, уменьшается.

Расчеты показывают, что при одном и том же проходном сечении решетки скорость истечения может быть различной в зависимости от диаметра отверстия (рис. 5): с увеличением диаметра отверстия возрастает как скорость истечения зернистого материала, так и критическая скорость газа  $U_2$ . Расход зернистого материала растет также при увеличении проходного сечения решетки и плотности частиц. На рис. 6 показано влияние плотности газа и частиц, а также проходного сечения решетки на предельную скорость газа. Кривые  $U_2(\rho_g)$ ,  $U_2(\rho_s)$  рассчитаны для  $d_o = 5,0 \cdot 10^{-3}$  м,  $d_s = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м,  $\varphi = 0,4$ ;  $U_2(\varphi)$  — для  $d_o = 2,35 \cdot 10^{-3}$  м,  $d_s = 0,59 \cdot 10^{-3}$  м,  $\rho_s = 1470$  кг/м<sup>3</sup>. Видно, что  $U_2$  уменьшается при увеличении плотности газа и возрастает (непропорционально) при увеличении плотности частиц и проходного сечения решетки.

В целом имеет место качественное соответствие с наблюдаемыми на практике [4] закономерностями изменения  $U_2$  и  $j$ . Количественное сравнение из-за отсутствия необходимой информации можно провести лишь с экспериментальными данными [3] (рис. 7). В [3] применялась секционирующая перегородка с живым сечением  $\varphi = 0,4$ . Полагая (см. выше)  $S_o/S_1 = \varphi = 0,4$ ,  $S_o/S_2 = 1$  и пользуясь таблицей для гидравлического сопротивления диафрагмы [9, с. 196], можно установить, что для рассматриваемого случая  $\zeta_g = 0,4$ . Величина порозности свода  $\epsilon$ , как это обосновано в [7], принята равной 0,5.

Из рис. 7 видно, что расхождение между результатами экспериментов (точки) и расчета (сплошные линии) во всем диапазоне скоростей газа не превышает 10%. Экстраполяция экспериментальных данных до скорости, при которой истечение частиц прекращается, позволяет также получить значение критической скорости  $U_2$ , близкое к расчетному.

Интересно отметить, что небольшое качественное различие эксперимента и теории имеет место в области малых скоростей. Результаты расчетов дают относительно резкое снижение расхода частиц в очень узком диапазоне малых скоростей газа ( $0 < U < U_1$ ), соответствующем равномерному режиму истечения. В экспериментах такого резкого снижения расхода частиц не наблюдается. Здесь этот диапазон скоростей более растянут. Отмеченные несоответствия легко объяснить, если предположить, что на практике при-



нятое в модели равномерное распределение газа по отверстиям в области малых скоростей выполняется нестрого. Причиной этому могут быть, например, дефекты изготовления решетки или неравномерность по объему слоя плотности начальной засыпки. В такой ситуации смена режима работы отверстий происходит на части решетки раньше, благодаря чему темп падения  $j$  замедляется. При дальнейшем увеличении скорости произойдет псевдооживление дисперсного материала, и неравномерность засыпки сказываться не будет.

**5. Заключение.** Предложенная модель истечения дисперсного материала через решетку при наличии противотока газа позволила получить не содержащие новых эмпирических коэффициентов и хорошо согласующиеся с экспериментальными данными соотношения для расчета расхода зернистого материала и предельной скорости газа, при которой транспорт частиц через решетку прекращается. Для узких диапазонов параметров эти соотношения могут иметь более простой вид, например, в тех случаях, когда можно пренебречь одним из членов в уравнении Эргана. Предложенная теория позволяет оценить также локальные характеристики процесса, такие как перепад давления на решетке, средние скорости газа в отверстиях, работающих в различных режимах, доли этих отверстий и др. Изложенный подход к анализу транспорта зернистого материала через решетку при наличии противотока газа может быть применен при рассмотрении процесса транспорта зернистого материала через решетки со щелевыми отверстиями с заданным законом распределения параметров отверстий по сечению решетки (эта задача возникает, например, при разработке аппаратов с заданной циркуляцией частиц в объеме слоя и в других случаях), а также при определении условий исключения попадания зернистого материала в подрешеточное пространство опорной газораспределительной решетки в аппаратах псевдооживленного слоя. Хорошее совпадение результатов расчета и экспериментов по транспорту зернистого материала через решетку можно также рассматривать как дополнительное подтверждение элементарной теории истечения зернистого материала из одиночного отверстия при наличии противотока газа [6, 7], основные положения и результаты которой были использованы в данной работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Буфетов Н. С., Кувшинов Г. Г., Могильных Ю. И. Исследование многосекционного топочно-теплообменного аппарата с кипящим слоем // Процессы переноса в энергетических многофазных системах. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1983. С. 14–27.
2. Kai T., Takohashi T., Ajiora M., et al. Effect of internal baffles on conversion of hydrogen chloride oxidation and pressure fluctuations in a fluidized catalyst bed // J. Chem. Eng. Japan. 1988. V. 21, N 6. P. 655–657.
3. Бурдуков А. П., Кувшинов Г. Г., Мухин А. И. Тепло- и массоперенос через горизонтальную провальную решетку в псевдооживленном слое // ПМТФ. 1990. № 5. С. 81–88.
4. Тюрчев И. Я., Буйлов А. Б. Исследование и расчет сетчатых решеток для секционированных реакторов со взвешенным слоем катализатора // Журн. прикл. химии. 1962. Т. 35, № 10. С. 2224–2230.
5. Мартюшин И. Г., Головин В. Н. К исследованию аппаратов с псевдооживленным слоем, секционированных провальными тарелками // Процессы, аппараты и машины химических производств. М.: Машиностроение, 1964. Т. 26. С. 23–32.

6. **Kuvshinov G. G.** Gravity effluxion of solid particles from a fluidized bed to a free bulk through a horizontal grid under gas counter flow // Int. Meeting on Chem.Eng. and Biotechn. (АСНЕМА-94): Abstrs. 1994. P. 7. 6.
7. **Кувшинов Г. Г.** Истечение зернистого материала из отверстия при наличии противотока газа // ПМТФ. 1995. Т. 36, № 6. С. 85-93.
8. **Гольдштик М. А.** Процессы переноса в зернистом слое. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1984.
9. **Чугаев Р. Р.** Гидравлика. Л.: Энергоиздат, 1982.

*Поступила в редакцию 23/XI 1994 г.*

---