

$$D_n = 0.1244 (t_0 - t_c) \left( 1 + \frac{\theta_n \mu_n^2}{P d_1 - \mu_n^2} \right) \{ [(1 - K_\lambda) \sin \mu_n + K_\lambda \mu_n \cos \mu_n] \sin [\sqrt{K_a} (K_R - 1) \mu_n] + \sqrt{K_a} \mu_n \sin \mu_n \cos [\sqrt{K_a} (K_R - 1) \mu_n] \} \frac{B t}{\mu_n \Delta \mu}$$

для второй задачи, когда рассматривается система двух вложенных шаров.

При практических расчетах критерий  $Fo$ , как правило, достаточно велик, поэтому в соотношениях для вычисления  $t_s$  в уравнениях (11) и (31) можно ограничиться одним членом ряда, и тогда формула (32) имеет вид

$$u = A \left\{ \int_0^\tau \exp [B \exp (-k\tau) + D_1 \exp (C_1\tau)] d\tau - \varphi\tau \right\}$$

или

$$u = A \left\{ \frac{D_1 \exp (C_1\tau)}{C_1} \int_{D_1}^z \exp [z + B (z/D_1)^{-k/C_1}] \frac{dz}{z} - \varphi\tau \right\}, \quad (33)$$

где  $z = D_1 \exp (C_1\tau)$ .

### В ы в о д ы

На основании закона Дальтона, описывающего количество влаги, испаряющейся с поверхности, и анализа факторов, определяющих интенсивность испарения, получены расчетные формулы для определения величины потерь массы при сушке материала на инертных частицах.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] И. Г. А л я м о в с к и й. Применение специальных функций к некоторым задачам холодильной технологии. Сб. тр. научно-техн. конф. Изд. ЛТИХП, Л., 82 (1970). — [2] С. С. К у т а т е л и д з е. Основы теории теплообмена. М. (1979). — [3] Э. Р. Э к к е р т, Р. М. Д р е й к. Теория тепло- и массообмена. М., 548 (1961). — [4] А. В. Л ы к о в. Теория теплопроводности. М. (1967).

Поступило в Редакцию  
7 февраля 1983 г.

Ленинградский  
технологический институт  
холодильной промышленности

М 8, 1983 г.

УДК 533.9.07 : 533.527

## ВЗВЕШЕННЫЙ СЛОЙ ЧАСТИЦ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ

*И. И. Смутьский*

В химической технологии и энергетике широкое применение находят аппараты со взвешенным слоем частиц. Известно, что скорость взвешивания  $u_v$  слоя, созданного в поле сил тяжести с ускорением  $a = g$ , должна быть меньше скорости уноса,

$$u_v = \frac{(\rho_c - \rho) a d^2}{18\mu}, \quad (1)$$

где  $\rho_c$ ,  $d$  — плотность и диаметр частиц соответственно;  $\rho$ ,  $\mu$  — плотность и вязкость среды.

Если ускорение  $g$  заменить большим по величине центробежным ускорением  $a = v^2/r$ , то за счет увеличения скорости взвешивания можно значи-

тельно увеличить производительность аппарата. Известны примеры создания слоя, взвешенного в поле центробежных сил, во вращающейся [1] и в неподвижной плоской вихревой камерах [2, 3]. Последний вариант привлекает своей простотой и более высокой надежностью. Однако в вихревой камере существуют торцевые области с усиленными радиальными скоростями, которые способствуют выносу частиц из слоя. Поэтому попытки создать взвешенный слой частиц в неподвижной цилиндрической вихревой камере [1] оказались безуспешными.

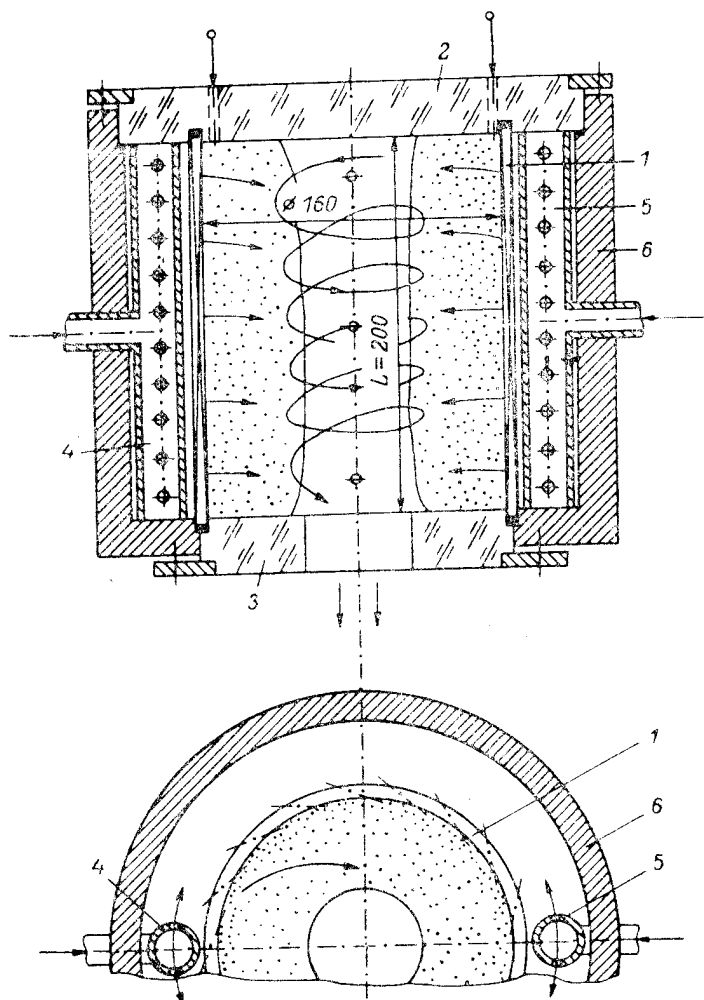


Рис. 1. Цилиндрическая вихревая камера.

Чтобы препятствовать выносу частиц, торцевые крышки плоских вихревых камер профилируют по закону гиперболы [2] или дополнительно вдувают газ в торцевую область [3]. Недостатком таких камер является малая их длина, вследствие чего приторцевые процессы играют большую роль, а удельная производительность камер не высока.

Целью настоящей работы являлось создание взвешенного слоя в цилиндрической камере с отношением длины к диаметру  $L/D_k = 1.25$  (рис. 1).

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Внутренний объем камеры образован цилиндром-завихрителем 1 и прозрачными торцевыми крышками 2 и 3. Два симметрично расположенных коллектора 4 и 5 и кольцевой зазор между завихрителем 1 и корпусом 6 обеспечивают равномерное распределение воздуха по длине и окружности завих-

рителя. Ввод воздуха в камеру происходит через отверстия 0.8 мм в завихрителе, расположенные в 18 рядов по окружности, с шагом 5 мм в каждом ряду и в шахматном порядке между соседними рядами. Общая площадь отверстий  $f_{\text{вх}}=360 \text{ мм}^2$ , а угол наклона к радиусу составляет  $\psi_{\text{вх}}=65^\circ$ .

Радиус выходного отверстия вихревой камеры в экспериментах изменялся и принимал значения  $R_1=15, 27.5, 60 \text{ мм}$ . Следует отметить, что данной работе предшествовали эксперименты со взвешенным слоем в плоской вихревой камере  $D_{\text{к}}=100 \text{ мм}$  и  $L=20 \text{ мм}$ , на основании которых были рассчитаны параметры настоящей цилиндрической вихревой камеры.

Подача порошка осуществляется через 4 отверстия диаметром 2.5 мм, расположенных на торцевой крышке 2 под углом  $30^\circ$  к ее плоскости и перпендикулярно радиусу. Расход воздуха на подачу порошка не превышает 5–6% от общего расхода воздуха. В экспериментах использовались частицы кремния с  $d < 40 \text{ мкм}$  и три фракции кварцевого песка: 0–71, 71–100, 100–160 мкм.

После подачи основного расхода воздуха через завихритель 1 из питателя в камеру подавался порошок, который образовывал кольцевой вращающийся взвешенный слой у верхней крышки 2. По мере дальнейшей подачи порошка слой распространялся на всю длину камеры. В начальный момент слой хорошо наблюдался через торцевые крышки. В дальнейшем по мере накопления порошка видимость в камере ухудшалась, и наблюдение за слоем осуществлялось путем отбора проб радиальными трубками из трех точек на разных высотах камеры ( $z/L=0.1, 0.5, 0.9$ ). По окончании работы резко прекращалась подача воздуха и удерживавшийся в камере порошок оседал в виде кольца на нижней торцевой крышке 3. Взвешиванием определялась его масса. Масса поданного в камеру порошка определялась непрерывным взвешиванием питателя.

В процессе работы камеры со взвешенным слоем наблюдается ряд интересных явлений. Порошок в камере электризовался и при отсутствии заземления на конструкции камеры наводился значительный заряд. У верхней крышки образовались четко разделенные кольца вращающихся слоев порошка, со свободной от порошка центральной областью. По внутренней поверхности крышки наблюдался вынос частиц из периферийных слоев в центральные. Однако на расстоянии 1–2 мм от торца происходило возвращение частиц в периферийную область. После длительного нахождения частиц в слое они становились сферообразными, а белый порошок кварца приобретал темный оттенок.

Было установлено, что из камеры выносятся только мелкие частицы ( $d < 5 \text{ мкм}$ ) как во время подачи порошка, так и после прекращения подачи. На рис. 2, а представлено изменение массы слоя  $M$  по отношению к начальной  $M_0$  с течением времени, начиная с момента прекращения подачи порошка. Видно, что за 30 мин работы масса слоя уменьшилась на 29%. Уменьшение массы происходит за счет мелких частиц, имевшихся

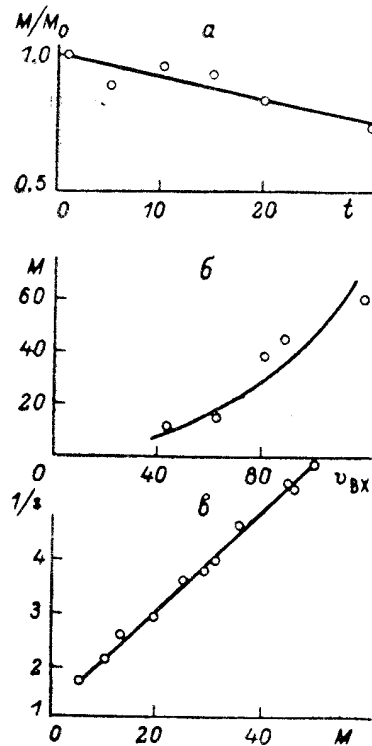


Рис. 2. Результаты исследования взвешенного слоя частиц (фракции  $d=71-100 \text{ мкм}$ ) в вихревой камере с  $2R_1=55 \text{ мм}$  при расходе воздуха  $Q=168 \text{ м}^3/\text{ч}$  (а, в).

$t$  — время (мин);  $v_{\text{вх}}$  — тангенциальная скорость воздуха на входе в слой (м/с),  $M$  — масса слоя (г).

в исходном порошке и образовавшихся при разрушении крупных частиц. Следует отметить, что масса слоя из более мелкой фракции  $d=0-71$  мкм за 43 мин работы уменьшалась только на 19.5%. По-видимому, уменьшение выноса с уменьшением размера фракции обусловлено меньшим износом более мелких частиц.

С увеличением массы слоя скорость его вращения замедляется и дальнейшая подача порошка приводит к внезапному выбросу до 70—90% порошка из камеры. Если же прекратить подачу порошка, то скорость вращения слоя возрастает и затем возможна дополнительная подпитка слоя порошком. Таким образом, было выяснено, что масса слоя зависит от расхода порошка, скорости входа частиц в камеру и равномерности распределения частиц по высоте камеры. Следует отметить, что в экспериментах скорость входа частиц в камеру изменялась за счет изменения расхода воздуха на подачу порошка в камеру. Для достижения наибольшей массы слоя необходимо, чтобы скорость входа порошка соответствовала тангенциальной скорости слоя, а расход был таким, чтобы не происходило локальной перегрузки слоя. Ускорить загрузку слоя можно при подаче порошка одновременно с двух торцов камеры. При односторонней подаче время подачи составляло 2—3 мин.

Исследовалось влияние расхода воздуха  $Q$ , размера частиц и радиуса выходного отверстия  $R_1$  на массу слоя. Наибольшее влияние оказывает расход воздуха. На рис. 2, б показано, что с увеличением входной тангенциальной скорости

$$v_{\text{вх}} = Q \sin \psi_{\text{вх}} / f_{\text{вх}} \quad (2)$$

масса взвешенного слоя возрастает. В исследованных диапазонах изменения расходов наблюдается увеличение роста массы слоя с увеличением  $v_{\text{вх}}$ . Уменьшение диаметра частиц также приводит к увеличению массы слоя. Так, при одном и том же расходе воздуха масса слоя частиц кремния ( $\rho_{\text{ч}} = 2.32$  г/см<sup>3</sup>) фракции  $d=0-40$  мкм больше в 2.5 раза массы слоя частиц песка с близкой плотностью ( $\rho_{\text{ч}} = 2.59$  г/см<sup>3</sup>), но большими размерами ( $d=100-160$  мкм). Увеличение массы слоя с уменьшением размера частиц происходит также для всех трех исследованных фракций песка за счет увеличения радиальной ширины слоя и уменьшения трения частиц о цилиндрическую стенку камеры. Увеличение радиуса выходного отверстия с  $R_1/R_{\text{к}}=0.344$  до 0.75 приводит к уменьшению массы слоя в 1.5 раза. Это объясняется уменьшением радиальной ширины слоя и отсевом мелких фракций порошка. В этих экспериментах наибольшая масса слоя достигала  $M_0=146$  г при фракции  $d=0-71$  мкм,  $v_{\text{вх}}=115$  м/с,  $R_1/R_{\text{к}}=0.344$ .

В результате исследований гидродинамики вихревых камер при разных крутках  $K = \pi D_{\text{к}} \sin \psi_{\text{вх}} / f_{\text{вх}}$  и длинах камеры было установлено [4], что профиль тангенциальной скорости в периферийной области камеры ( $R_1 < r < R_{\text{к}}$ ) описывается соотношением

$$vr^n = \text{const}, \quad \text{где } \omega_{\text{вх}} = R_{\text{к}} \omega_{\text{вх}} \quad v/f_{\text{вх}} = v_{\text{вх}} \quad (3)$$

$$n = [1 + 1 \cdot 10^{-4} K^2 D_{\text{к}} / L]^{-0.5} \quad v/f_{\text{вх}} = R_{\text{к}} \quad (4)$$

Однако тангенциальная скорость частиц  $v_{\text{ч}}$  в камере со слоем значительно меньше скорости газа  $v$  в незагруженной вихревой камере. Оценить тангенциальную скорость частиц  $v_{\text{ч}}$  в слое по известной скорости  $v$  можно с помощью соотношения [5]

$$v_{\text{ч}} = v \cdot \sqrt{s}, \quad (5)$$

где  $s = P_{\text{к}}^* / P_{\text{к}}$  — параметр торможения потока слоем, определенный как отношение статического давления на периферии камеры при наличии слоя к тому же давлению в камере без слоя. Здесь под статическим давлением  $P_{\text{к}}^*$ ,  $P_{\text{к}}$  подразумевается избыточное давление. На рис. 2, в показано, что величина, обратная параметру  $s$ , изменяется пропорционально массе слоя. Можно записать

$$1/s = 0.09M + 1.25 = 4.54 \cdot 10^{-3} M_{\text{отн}} + 1.25, \quad (6)$$

где  $M$  — масса слоя (в г),  $M_{\text{отн}} = M \cdot \sin \psi_{\text{вх}} / \rho R_{\text{к}} f_{\text{вх}}$ .

в исходном порошке и образовавшихся при разрушении крупных частиц. Следует отметить, что масса слоя из более мелкой фракции  $d=0-71$  мкм за 43 мин работы уменьшалась только на 19.5%. По-видимому, уменьшение выноса с уменьшением размера фракции обусловлено меньшим износом более мелких частиц.

С увеличением массы слоя скорость его вращения замедляется и дальнейшая подача порошка приводит к внезапному выбросу до 70—90% порошка из камеры. Если же прекратить подачу порошка, то скорость вращения слоя возрастает и затем возможна дополнительная подпитка слоя порошком. Таким образом, было выяснено, что масса слоя зависит от расхода порошка, скорости входа частиц в камеру и равномерности распределения частиц по высоте камеры. Следует отметить, что в экспериментах скорость входа частиц в камеру изменялась за счет изменения расхода воздуха на подачу порошка в камеру. Для достижения наибольшей массы слоя необходимо, чтобы скорость входа порошка соответствовала тангенциальной скорости слоя, а расход был таким, чтобы не происходило локальной перегрузки слоя. Ускорить загрузку слоя можно при подаче порошка одновременно с двух торцов камеры. При односторонней подаче время подачи составляло 2—3 мин.

Исследовалось влияние расхода воздуха  $Q$ , размера частиц и радиуса выходного отверстия  $R_1$  на массу слоя. Наибольшее влияние оказывает расход воздуха. На рис. 2, б показано, что с увеличением входной тангенциальной скорости

$$v_{\text{вх}} = Q \sin \psi_{\text{вх}} / f_{\text{вх}} \quad (2)$$

масса взвешенного слоя возрастает. В исследованных диапазонах изменения расходов наблюдается увеличение роста массы слоя с увеличением  $v_{\text{вх}}$ . Уменьшение диаметра частиц также приводит к увеличению массы слоя. Так, при одном и том же расходе воздуха масса слоя частиц кремния ( $\rho_{\text{ч}} = 2.32$  г/см<sup>3</sup>) фракции  $d=0-40$  мкм больше в 2.5 раза массы слоя частиц песка с близкой плотностью ( $\rho_{\text{ч}} = 2.59$  г/см<sup>3</sup>), но большими размерами ( $d=100-160$  мкм). Увеличение массы слоя с уменьшением размера частиц происходит также для всех трех исследованных фракций песка за счет увеличения радиальной ширины слоя и уменьшения трения частиц о цилиндрическую стенку камеры. Увеличение радиуса выходного отверстия с  $R_1/R_{\text{к}}=0.344$  до 0.75 приводит к уменьшению массы слоя в 1.5 раза. Это объясняется уменьшением радиальной ширины слоя и отсевом мелких фракций порошка. В этих экспериментах наибольшая масса слоя достигала  $M_0=146$  г при фракции  $d=0-71$  мкм,  $v_{\text{вх}}=115$  м/с,  $R_1/R_{\text{к}}=0.344$ .

В результате исследований гидродинамики вихревых камер при разных крутках  $K = \pi D_{\text{к}} \sin \psi_{\text{вх}} / f_{\text{вх}}$  и длинах камеры было установлено [4], что профиль тангенциальной скорости в периферийной области камеры ( $R_1 < r < R_{\text{к}}$ ) описывается соотношением

$$vr^n = \text{const}, \text{ где } \omega/r = R_{\text{к}} = v_{\text{вх}} \quad v/f_{\text{вх}} = v_{\text{вх}} \quad (3)$$

$$n = [1 + 1 \cdot 10^{-4} K^2 D_{\text{к}} / L]^{-0.5}. \quad v/f_{\text{вх}} = R_{\text{к}} \quad (4)$$

Однако тангенциальная скорость частиц  $v_{\text{ч}}$  в камере со слоем значительно меньше скорости газа  $v$  в незагруженной вихревой камере. Оценить тангенциальную скорость частиц  $v_{\text{ч}}$  в слое по известной скорости  $v$  можно с помощью соотношения [5]

$$v_{\text{ч}} = v \cdot \sqrt{s}, \quad (5)$$

где  $s = P_{\text{к}}^* / P_{\text{к}}$  — параметр торможения потока слоем, определенный как отношение статического давления на периферии камеры при наличии слоя к тому же давлению в камере без слоя. Здесь под статическим давлением  $P_{\text{к}}^*$ ,  $P_{\text{к}}$  подразумевается избыточное давление. На рис. 2, в показано, что величина, обратная параметру  $s$ , изменяется пропорционально массе слоя. Можно записать

$$1/s = 0.09M + 1.25 = 4.54 \cdot 10^{-3} M_{\text{отн}} + 1.25, \quad (6)$$

где  $M$  — масса слоя (в г),  $M_{\text{отн}} = M \cdot \sin \psi_{\text{вх}} / \rho R_{\text{к}} f_{\text{вх}}$ .

Если учесть, что скорость взвешивания слоя для цилиндрической вихревой камеры является радиальной скоростью

$$u_r = Q/2\pi rL, \quad (7)$$

то представленные соотношения (1)–(7) позволяют определить кинематические параметры слоя. Результаты расчетов для слоя с массой  $M_0=146$  г и расходом воздуха  $Q=168$  м<sup>3</sup>/ч представлены в таблице при крайних значениях радиуса слоя.

Результаты расчета скоростей в камере

r (мм)	d (мкм)	v	v <sub>ч</sub>	u <sub>γ</sub>	u <sub>в</sub>	α	u <sub>γ</sub> /u <sub>в</sub>
		м/с					
80	71	115	30.4	442	0.458	11500	967
27.5	5	176	46.4	15	1.32	78300	11.4

Примечание. v — тангенциальная скорость воздуха в отсутствии слоя, v<sub>ч</sub> — тангенциальная скорость частиц, u<sub>в</sub> — скорость взвешивания, u<sub>γ</sub> — скорость уноса при центробежном ускорении частиц равно α.

При расчетах принято, что самые крупные частицы, имеющиеся в слое  $5 < d < 71$  мкм, располагаются у стенки камеры, а самые мелкие на радиусе выходного отверстия.

Известно [6], что для рассматриваемых частиц при отношении скорости уноса к скорости взвешивания больше 78 слой не будет находиться во взвешенном состоянии. Из данных таблицы видно, что для частиц  $d=71$  мкм отношение  $u_\gamma/u_v$  значительно превышает 78, т. е. эти частицы не находятся во взвешенном состоянии, а прижаты центробежной силой к поверхности завихрителя и перемещаются по окружности вдоль нее. Этим и обуславливается наблюдаемый износ поверхности завихрителя как в исследуемой камере, так и в плоских [2]. Причем износ цилиндрической поверхности более существен, чем износ торцевых стенок. Поэтому основная потеря исходного момента количества движения потока в вихревой камере со взвешенным слоем происходит за счет соударения частиц о цилиндрическую поверхность, а не за счет трения о торцевые стенки, как предполагается некоторыми исследователями [3].

Если для рассматриваемого режима при  $u_\gamma/u_v=78$  определить наибольший диаметр частиц, слой из которых будет во взвешенном состоянии, то он составит  $d=20$  мкм. Действительно, анализ размеров частиц слоя из фракции 0–71 мкм, находившегося в камере 5–10 мин, показал, что 80% частиц имеют размер 10–20 мкм, а частицы более 30 мкм встречаются очень редко, т. е. крупные частицы быстро измельчаются и в слое остаются только взвешенные частицы.

Итак, чтобы наибольшие частицы диаметром  $d_{\text{макс}}$ , имеющиеся в слое, были взвешены необходимо, чтобы отношение  $u_\gamma/u_v$  для них не превышало 78. Тогда, используя выражения (1)–(7), получаем условия существования взвешенного слоя частиц размером  $d < d_{\text{макс}}$  в цилиндрической вихревой камере

$$\frac{\pi(\rho_c - \rho) d_{\text{макс}}^2 Q \sin^2 \psi_{\text{вх}}}{9\rho f_{\text{вх}}^2} = \frac{78}{s}, \quad (8)$$

где s — параметр торможения потока слоем, а геометрические параметры могут быть рекомендованы следующие:  $L \sim D_k$ ,  $45^\circ < \psi_{\text{вх}} < 70^\circ$ ,  $f_{\text{вх}} > \pi D_k \sin \psi_{\text{вх}}/300$ ,  $0.3 < R_1/R_k < 0.6$ .

В рассматриваемом выше примере слоя массой  $M_0=146$  г, параметр  $s=0.07$  и первая часть выражений (8) равна 1112. Левая часть выражает отношение центробежной силы к силе Стокса для одиночной частицы в вихревой камере, которое, как известно, на равновесной траектории равно единице.

Поэтому условие существования взвешенного слоя (8) можно интерпретировать как необходимость создания на 2—3 порядка большей центробежной силы, чем требуется на равновесной траектории одиночной частицы в вихревой камере.

Частицы, для которых скорость взвешивания  $u_v$ , направленная к центру, превысит величину скорости уноса  $u_y$ , будут перемещаться на орбиты с меньшим радиусом. Если же для частиц некоторого диаметра скорость взвешивания достигнет скорости уноса на радиусе выходного отверстия  $r=R_1$ , то дальнейшее увеличение  $u_v$  приведет к выносу частиц из камеры. Поэтому наименьший диаметр частицы, удерживаемой в слое, определяется из соотношений (1)—(7) при  $r=R_1$  и  $u_y/u_v=1$  в виде

$$\frac{\pi(\rho_v - \rho) d_{\text{мин}}^2 L Q \sin^2 \psi_{\text{вх}} s}{9\mu^2 f_{\text{вх}}^2} \left(\frac{R_k}{R_1}\right)^{2n} = 1. \quad (9)$$

В полученные расчетные формулы (8) и (9) входит параметр торможения  $s$ , определяемый соотношением (6), которое справедливо для рассматриваемого случая. Чтобы обобщить полученные результаты для произвольных условий, необходимо рассмотреть условия равновесия моментов сил. Момент сил, обусловленный истечением газа из завихрителя, равен

$$\Omega_{\text{зав}} = \rho Q v_{\text{вх}} R_k. \quad (10)$$

Исходный момент  $\Omega_{\text{зав}}$  разделяется на момент трения  $\Omega_{\text{тр}}$  слоя о завихритель и на изменение момента количества движения или, другими словами, перенос момента количества движения потока газа, проходящего через слой,  $\Omega_{\text{пот}}$ , т.е.

$$\Omega_{\text{зав}} = \Omega_{\text{тр}} + \Omega_{\text{пот}}. \quad (11)$$

При коэффициенте трения  $f$  слоя о поверхность завихрителя и силе прижатия частиц слоя  $F$  момент трения будет  $\Omega_{\text{тр}} = fF \cdot R_k$ . Сила прижатия каждой частицы слоя равна разности между центробежной силой  $m v_{\text{ч}}^2 / R_k$  и силой Стокса  $3\pi\mu d u_v$ . Тогда суммирование по всем частицам даст

$$\Omega_{\text{тр}} = M v_{\text{ч}}^2 f \left(1 - \frac{3\pi\mu u_v R_k \Sigma d}{M v_{\text{ч}}^2}\right), \quad (12)$$

где  $\Sigma d$  — сумма всех диаметров частиц, а  $M$  — масса всех частиц. Так как тангенциальная скорость потока, прошедшего через взвешенный слой, равна тангенциальной скорости слоя  $v_{\text{ч}}$ , то изменение момента количества движения, переносимое потоком, будет

$$\Omega_{\text{пот}} = \rho Q v_{\text{ч}} R_k. \quad (13)$$

Если в формулу (11) подставить выражения для моментов (10), (12) и (13) и учесть, что на радиусе  $R_k$  тангенциальная скорость слоя  $v_{\text{ч}} = \sqrt{s} \cdot v_{\text{вх}}$ , то выражение (11) запишется в виде

$$\frac{1}{s} = M_{\text{отн}} f \left(1 - \frac{3\pi\mu u_v R_k \Sigma d}{v_{\text{ч}}^2 M}\right) + \frac{1}{\sqrt{s}}, \quad (14)$$

где относительная масса слоя

$$M_{\text{отн}} = M / (\rho R_k f_{\text{вх}} / \sin \psi_{\text{вх}}). \quad (15)$$

При полном взвешивании центробежная сила для всех частиц уравновешена силой Стокса и коэффициент при  $M_{\text{отн}}$  равен нулю, поэтому параметр торможения  $s=1$ . При неполном взвешивании параметр торможения будет зависеть от относительной массы слоя. Поэтому в экспериментально полученную зависимость (6) введена масса слоя в относительном виде (15). Зависимость (6) в относительном виде можно использовать в тех случаях, когда условия, определяемые коэффициентом при  $M_{\text{отн}}$  в уравнении (14), совпадают с условиями эксперимента.

## В ы в о д ы

В результате исследования влияния различных параметров получены формулы для расчета условий, необходимых для создания взвешенного слоя в цилиндрических вихревых камерах.

Автор выражает признательность П. Г. Нечаеву за участие в проведении экспериментов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, И. Д. Гойхман, Хим. и нефтян. машиностр., 1, 13 (1964). — [2] В. Н. Джекомис, Х. Д. Огейн, Вопросы ракетной техники, 9, 44 (1971). — [3] Z. A. Anderson, S. H. Nasinger, В. N. Turman. J. spacecraft rock., 9, 5, 311 (1972). — [4] И. И. Смутьский. Автореф. канд. дис. Инст. теплофиз. СО АН СССР, Новосибирск (1979). — [5] И. И. Смутьский. В сб. «Теплофизика и физическая гидродинамика». Институт теплофизики СО АН СССР, Новосибирск, 125 (1978). — [6] Катализ в кипящем слое. Под ред. И. П. Мухленова, В. М. Померанцева. Изд. «Химия», Л. (1978).

Поступило в Редакцию  
7 августа 1981 г.

М 9, 1983 г.

УДК 541.182

## ДИФфуЗИОННАЯ МОДЕЛЬ КЛАССИФИКАЦИИ ЧАСТИЦ В РАЗРЕЖЕННЫХ СУСПЕНЗИЯХ

В. Б. Броунштейн

Процесс классификации в простейшем случае состоит в разделении частиц полидисперсного ансамбля в поле внешних сил на две группы: «крупных» и «мелких» частиц.

Сложность описания процесса классификации определяется тем, что при течении суспензий возникают пульсации скорости частиц и циркуляционные токи, приводящие к перемешиванию крупных и мелких частиц. Влияние этого эффекта возрастает с увеличением геометрических размеров системы; например, при переходе от опытных к промышленным аппаратам.

Целью настоящей работы является получение в рамках одномерной диффузионной модели функции распределения частиц по размерам в произвольной точке системы и расчет величин и гранулометрического состава потоков, выводимых из классификатора.

Для определенности рассмотрим движение частиц с плотностью  $\rho_x$  в менее плотной сплошной среде с  $\rho_0 < \rho_x$ . Средняя скорость среды  $\bar{v}$  направлена вдоль оси  $h$  (рис. 1). Стационарная средняя скорость  $\bar{w}$  движения частиц диаметром  $d$  относительно среды может быть определена в виде зависимости

$$Re = f(Ar), \quad (1)$$

Рис. 1. Система координат.

где  $Re = d\bar{w}/\nu$  — критерий Рейнольдса, а  $Ar = gd^3/(\rho_x - \rho_0)\nu^2 \rho_0$  — критерий Архимеда.

При движении частиц в гравитационном поле  $g$  — ускорение свободного падения. Конкретный вид зависимости (1) исследовался в работах [1-4]. В частности, для разреженных суспензий скорость гравитационного осаждения частиц в неподвижной жидкости не зависит от их объемной концентрации  $x$  и может быть рассчитана по соотношению [5]

$$Re = \frac{Ar}{28 + 0.61\sqrt{Ar}} \quad (x < 0.01). \quad (2)$$

Если сила тяжести направлена против вектора скорости сплошной среды (рис. 1), то конвективный перенос частиц относительно оси будет осуществляться со скоростью

$$\bar{u} = \bar{v} - \bar{w}. \quad (3)$$