

Рейнольдса имеют следующие количественные значения: при  $Re = 300 \dots 820$ :  $A = 0,127$ ,  $x = 0,212$ ; при  $820 < Re < 7000$ :  $A = 0,265$ ,  $x = 0,103$ .

Таким образом, проведены экспериментальные исследования порозности слою зернисто-волоконистых материалов при псевдооживлении в пределах чисел псевдооживления  $K_w = 0 \dots 2,0$ . Установлено, что при псевдооживлении зернисто-волоконистых материалов при помощи гидродинамически активных струй порозности слоя колеблется от 0,6 до 0,85. Результаты расчетов качественно согласуются с экспериментом во всем диапазоне изменения режимных параметров и коэффициента волоконистости частиц  $\eta = 1 \dots 2,32$ . При расчете и проектировании сушильных аппаратов для зернисто-волоконистых материалов необходимо учитывать коэффициент волоконистости подобных материалов.

#### Список литературы

1. *Забродский С. С.* Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое. М.: Госэнергоиздат, 1961.
2. *Куликов В. М., Носов В. С., Королев В. Н. и др.* Исследование флуктуаций порозности и интенсивности внешнего теплообмена в псевдооживленных слоях//Инж.-физ. журн. 1976. Т. 30 № 6. С. 980.
3. *Айнштейн В. Г.* О расчете порозности неоднородного псевдооживленного слоя//Теор. основы хим. технол. 1980. Т. 14. № 2. С. 314.
4. *Прозоров Е. Н., Масловский М. Ф., Бурков В. А.* Гидродинамическая обстановка вблизи цилиндрической поверхности, расположенной в псевдооживленном слое с горизонтальными вставками//Хим. пром-сть. 1972. № 4. С. 298.
5. *Завелев Е. Д., Вакк Э. Г., Семенов В. Н. и др.* Исследование порозности зернистого слоя по методу высоте методом рентгенографии//Теор. основы хим. технол. 1980. Т. 14. № 2. С. 303.
6. *Нурмухамедов Х. С., Нигмаджанов С. К., Салимов З. С. и др.* Гидромеханические свойства зернисто-волоконистых материалов. Ташкент, 1990.— 23 с.— Деп. в УзНИИТИ 16.04.90. № 1214 — Уз90.
7. *Нурмухамедов Х. С., Нигмаджанов С. К., Салимов З. С. и др.* Изучение псевдооживления зернисто-волоконистых материалов при помощи скоростной кино съемки//Республ. научно-практ. конф. Ташкент, 1990. С. 29.
8. *Салимов З. С., Нурмухамедов Х. С., Нигмаджанов С. К. и др.* Расчет скорости начала псевдооживления зернисто-волоконистых материалов//Теор. основы хим. технол. 1991. Т. 25. № 4. С. 588.

Ташкентский химико-технологический институт

Поступила в редакцию  
28.11.91

УДК 60.074.1

© 1992 г. В. А. МАРКОВ, А. И. ЕРШОВ, Б. М. ШИШЛО

### РАСЧЕТ ИНЕРЦИОННОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗО(ПАРО)ЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ

При выборе сепарационных устройств (брызгоотделителей) для разделения газо(паро)жидкостных систем наряду с режимными и конструктивными параметрами основных аппаратов необходимо учитывать и технологические особенности процессов, для которых они используются. Так, в выпарных аппаратах производства карбамида концентрирование раствора до плава обычно осуществляется в прямоточных трубчатых испарителях, и образующиеся вторичные пары с упаренным раствором поступают для разделения в сепарационное пространство. Применяемые в этих аппаратах известные конструкции брызгоотделителей (жа-

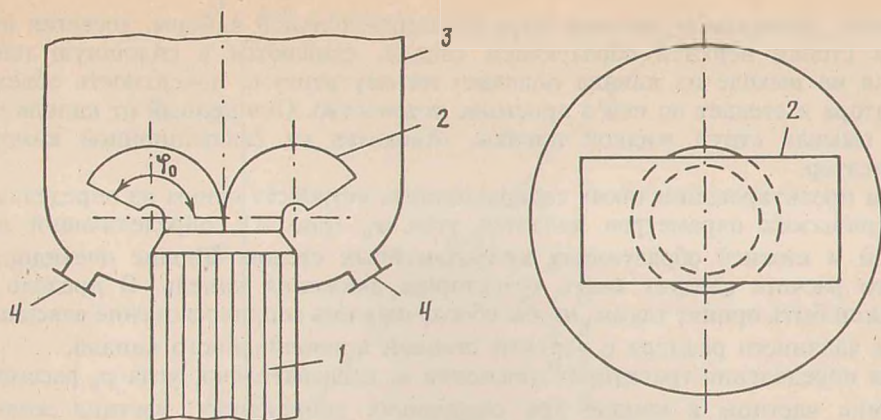


Рис. 1. Узел сепарации выпарного аппарата: 1 — нагревательная камера; 2 — сепарационное устройство; 3 — объемный сепаратор; 4 — сливной патрубков

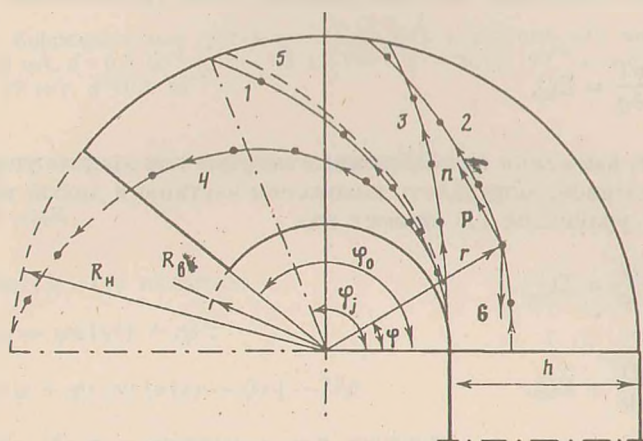


Рис. 2. Расчетная схема и траектории движения частиц ( $\rho_{ж} = 1000 \text{ кг/м}^3$ ): 1 —  $w_0 = 10 \text{ м/с}$ ;  $w = 0$ ,  $d = 10^{-3} \text{ м}$ ,  $r_0 = 0,04 \text{ м}$ ; 2 — 10; 0;  $10^{-3}$ ; 0,06; 3 — 10; 2;  $10^{-3}$ ; 0,04; 4 — 5; 0;  $0,5 \cdot 10^{-4}$ ; 0,04; 5 —  $w(r) \neq \text{const}$  (по экспериментальным данным),  $w = 0$ ,  $d = 10^{-3} \text{ м}$ ,  $r_0 = 0,04 \text{ м}$

люзийные, насадочные, циклонные и т. п.) не обеспечивают высокую степень их разделения из-за кристаллизации капель раствора в сепарационной камере. Данное явление приводит к «зарастанию» перечисленных выше сепарационных элементов и резкому снижению эффективности разделения после непродолжительного времени их эксплуатации, вследствие чего выпарные установки приходится часто выводить из нормального режима работы и осуществлять промывку каплеотделителей от образующихся кристаллических осадков [1]. В конечном счете повышаются энергозатраты и снижается производительность агрегатов производства карбамида в целом.

На основе экспериментальных исследований и промышленных испытаний авторами создана новая конструкция сепарационного устройства [2, 3], представляющая собой криволинейные патрубки прямоугольного сечения, развернутые в противоположные стороны (рис. 1) и устанавливаемые в сепарационном пространстве над трубной решеткой греющей камеры. Принцип разделения газожидкостной системы — инерционный, т. е. в поле массовых сил, возникающих при движении двухфазного потока в криволинейном канале. При этом капли

жидкости, увлекаемые потоком пара из нагревательной камеры, достигая поверхности стенки верхней образующей канала, сливаются в сплошную пленку, которая на выходе из канала попадает на внутреннюю поверхность объемного сепаратора и стекает по ней в приемное устройство. Очищенный от капель поток пара, омывая струи жидкой пленки, отводится из сепарационной камеры в конденсатор.

При проектировании таких сепарационных устройств одним из определяющих геометрических параметров является угол  $\varphi_0$  (рис. 1), определяющий длину верхней и нижней образующих криволинейных стенок. Вполне очевидно, что для его расчета следует знать траекторию движения капель. В пределе угол  $\varphi_0$  должен быть принят таким, чтобы обеспечивалось соприкосновение взвешенных частиц заданного размера с верхней стенкой криволинейного канала.

Для определения траектории движения и, следовательно, угла  $\varphi_0$  рассмотрим движение частицы в канале при следующих допущениях: частица жидкости имеет шарообразную форму; движение плоское; скорость потока газа по ширине канала постоянна; радиальная составляющая скорости газа равна нулю; влияние частиц на профиль скорости газового потока отсутствует.

Для описания движения частицы воспользуемся уравнениями Лагранжа 2-го рода [4]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = \Sigma Q_i \quad (1)$$

При плоском движении за обобщенные координаты принят угол  $\varphi$  и текущий радиус  $r$ , позволяющие определить положение частицы в любой момент времени (рис. 2). Тогда уравнение (1) примет вид

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = \Sigma Q_\varphi; \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{r}} \right) - \frac{\partial T}{\partial r} = \Sigma Q_r.$$

В правой части (2) в качестве обобщенных сил рассматривались основные силы, действующие на частицу: сила гидродинамического воздействия  $P$  и сила тяжести  $G$ , которые в проекциях на оси  $n$  и  $r$  можно записать в виде

$$\Sigma Q_\varphi = -Gr \cos \varphi + P_\varphi r; \quad (3)$$

$$\Sigma Q_r = -G \sin \varphi + P_r.$$

Для определения проекций  $P_\varphi$  и  $P_r$  запишем силу  $P$  в виде [5]

$$P = \psi \frac{\pi d^2}{4} \rho_r \frac{|v| v}{2},$$

где  $|v| = \sqrt{v_r^2 + [w(r) - v_\varphi]^2}$  — абсолютное значение скорости. Коэффициент сопротивления  $\psi$  определялся в зависимости от режима обтекания по известным формулам [5].

Проекции  $P$  на оси  $n$  и  $r$  соответственно равны

$$P_\varphi = \psi \frac{\pi d^2}{4} \rho_r \frac{[w(r) - v_\varphi] |v|}{2}; \quad (4)$$

$$P_r = \psi \frac{\pi d^2}{4} \rho_r v_r |v|.$$

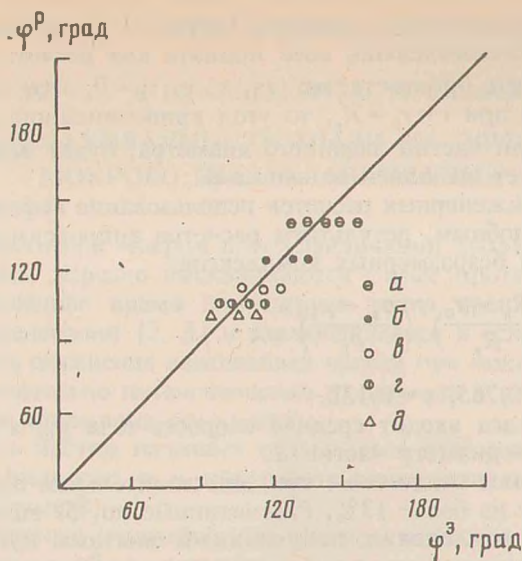


Рис. 3. Корреляционный график расчетных ( $\varphi^p$ ) и опытных ( $\varphi^3$ ) значений  $\varphi$ ; а —  $w_0 = 5$  м/с,  $d = 0,7 \cdot 10^{-3}$  м; б —  $8,5$ ;  $0,1 \cdot 10^{-3}$ ; в —  $10$ ;  $0,1 \cdot 10^{-3}$ ; г —  $8,5$ ;  $0,7 \cdot 10^{-3}$ ; д —  $w_0 = 10$  м/с,  $d = 0,7 \cdot 10^{-3}$  м

Подставляя кинетическую энергию частицы

$$T = \frac{m}{2} (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2)$$

в (2), с учетом (3), (4) получим

$$\ddot{r} = -g \sin \varphi - \psi k |v| \dot{r} + r \dot{\varphi}^2;$$

$$\ddot{\varphi} r = -g \cos \varphi + \psi k |v| [w(r) - \dot{\varphi} r] - 2\dot{r} \dot{\varphi},$$

где  $k = (\rho_s / \rho_f) \rho_f / (\rho_s d)$ ;  $g$  — ускорение силы тяжести.

Так как  $v_\varphi = \frac{d\varphi}{dt} r$ ,  $v_r = \frac{dr}{dt}$ ,  $r \frac{d}{dt} \left( \frac{d\varphi}{dt} \right) = \frac{dv_\varphi}{dt} - \frac{dr}{dt} \frac{d\varphi}{dt}$ , то

$$\frac{dv_r}{dt} = -g \sin \varphi - \psi k |v| \frac{dr}{dt} + r \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2; \quad (5)$$

$$\frac{dv_\varphi}{dt} = -g \cos \varphi + \psi k |v| [w(r) - v_\varphi] - \frac{dr}{dt} \frac{d\varphi}{dt}.$$

Для решения уравнений (5) был использован численный метод Рунге — Кутты — Фельберга. Начальные условия принимались следующими: при  $t = 0$ ,  $v_r = 0$ ,  $v_\varphi = v_0$ ,  $r = r_0$ ,  $\varphi = 0$ . Диаметр частиц изменялся в пределах  $5,0 \cdot 10^{-5} \dots 2,0 \cdot 10^{-3}$  м [6, 7]; средняя скорость газового потока  $w_0 = 3, 0 \dots 20$  м/с; начальная скорость частиц —  $(0 \dots 0,8) w_0$ ;  $R_b/R_n = 0,4 \dots 0,8$ ; плотность жидкости —  $1000 \dots 1700$  кг/м<sup>3</sup>; плотность газа —  $1,2$  кг/м<sup>3</sup>.

Для сравнения траекторий движения расчет выполнен при постоянной скорости газового потока по радиусу канала ( $w(r) = w_0 = \text{const}$ ), а также для профиля скорости, полученного для данного канала экспериментально.

На рис. 2 представлены результаты некоторых расчетов, согласно которым наибольший угол отклонения  $\varphi$  наблюдается при движении частиц при постоянной

скорости газа. С уменьшением диаметра частиц и их начальной скорости угол  $\varphi$ , увеличивается. Следовательно, если принять для расчета самые неблагоприятные условия работы брызгоотделителя, т. е.  $v_0 = 0$ ,  $w(r) = \text{const}$ , а начальное положение частицы при  $r = r_0 = R_b$ , то угол криволинейного канала  $\varphi_0$ , необходимый для сепарации частиц заданного диаметра, будет наибольшим, и конструктивно канал будет выполнен «с запасом».

Поскольку для инженерных расчетов использование выражений (5) представляется не вполне удобным, результаты расчетов аппроксимированы в виде степенной зависимости безразмерных комплексов:

$$\varphi_0 = 291,5 \text{ Re}^a \left( \frac{R_n - r_0}{R_b} \right)^b \left( \frac{\rho_x - \rho_r}{\rho_r} \right)^c, \quad (6)$$

где  $a = -0,053$ ,  $b = 0,765$ ,  $c = 0,132$ .

В число Рейнольдса входит средняя скорость газа  $w_0$ , в качестве геометрического параметра — диаметр частиц  $d$ .

Среднеквадратичное отклонение при сопоставительном анализе зависимостей (5) и (6) составляет не более 12%. Рассчитанные по (5) значения сравнивались со значениями угла отклонения, полученными опытным путем. Для этого проводился эксперимент, при котором твердые частицы сферической формы с плотностью  $1110 \text{ кг/м}^3$  вводились в поток газа при  $v_0 = 0$  на расстоянии от оси, равном  $0,042 \text{ м}$ . Траектории их не фиксировались, а определялся только угол отклонения  $\varphi$ , для чего на верхнюю внутреннюю стенку канала наносился тонкий слой смазочного материала (солидола). Частицы, соприкасаясь со стенкой, прилипали к ней, что позволило затем определить угол  $\varphi$ . Из рис. 3, где представлены результаты опытов, следует, что расчетные и опытные значения хорошо согласуются между собой.

#### ОБОЗНАЧЕНИЯ

$d$  — диаметр частиц;  
 $m$  — масса частицы;  
 $q_i$  — обобщенные координаты;  
 $\dot{q}_i$  — обобщенные скорости;  
 $r$  — текущий радиус;  
 $R_n, R_b$  — наружный и внутренний радиусы канала;

$T$  — кинетическая энергия частицы;  
 $v_0$  — начальная скорость частицы;  
 $v_\varphi, v_r$  — тангенциальная и радиальная составляющие скорости частицы;  
 $w_0$  — средняя скорость газа в канале;  
 $\rho_r, \rho_x$  — плотности газа и жидкости;  
 $\mu$  — вязкость газа;  
 $\text{Re} = w_0 d \rho_r / \mu$  — число Рейнольдса.

#### Список литературы

1. Горловский Д. М. и др. Основные направления развития технологии производства карбамида // Хим. пром-сть. 1980. № 5. С. 282.
2. Ершов А. И. и др. Выпарной аппарат для водных растворов кристаллизующихся веществ: А. с. 975024 СССР // Б. и. 1982. № 43.
3. Ершов А. И. и др. Новый аппарат для выпаривания водного раствора карбамида // Лицензинформ СССР. Советский экспорт. 1984. № 12.
4. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики. М.: Наука, 1967.
5. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1971.
6. Розен А. М., Голуб С. И., Вотинцева Т. И. О закономерностях капельного уноса при барботаже // Теор. основы хим. технол. 1978. Т. 12. № 6. С. 817.
7. Розен А. М., Голуб С. И., Давыдов И. Ф. и др. Некоторые закономерности капельного уноса // Докл. АН СССР. 1969. Т. 187. № 2. С. 318.