

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудряшова О.Б., Ворожцов Б.И., Муравлев Е.В., Ахмадеев И.Р., Павленко А.А., Титов С.С. // Известия ВУЗов. Физика, – № 8/2, 2008. – С. 115-121.
2. Кудряшова О.Б., Ворожцов Б.И., Архипов В.А. // Известия ВУЗов. Физика, – № 8/2, 2008. – С. 107-114.
3. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли — пыли, дымы, туманы. М.: Химия, 1972. – 428 с.
4. Ишматов А.Н., Ворожцов Б.И. // Краткие сообщения по физике. ФИАН – Москва. – № 1 – 2010. – С. 22-27.
5. Козырев А.В., Ситников А.Г. // Успехи физических наук, – Т. 171. – № 7. – 2001. – С. 765-774.
6. Gudris N., Kulikowa L., // Zeitschrift fur Physik. – V. 25. – № 2. – 1924. – P. 121-132.
7. Ахмадеев И. Р. Метод и быстродействующая лазерная установка для исследования генезиса техногенного аэрозоля по рассеянию луча в контролируемом объеме: дис ... канд. тех. наук. – АлтГТУ – Бийск, 2008.

8. Ишматов А.Н. / Материалы Всероссийской научно-практической конференции 16-17 апреля 2009 года. АлтГТУ, БТИ. – Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2009: в 2-х т. – Т.1. – С. 147-149.
9. Сысолятин С.В., Сурмачёв В.Н., Дубков А.С., Бояринова Н.В., Ишматов А.Н. // Ползуновский вестник. АлтГТУ – Барнаул. – №3 – 2008. – С. 131-133.
- Фукс Н. А. Испарение и рост капель в газовой среде. – М.: Мир, 1986. – 314 с.
10. Спурный К., Нех Ч., Седлачек Б. и др. Аэрозоли. – М.: Атом-издат, 1964. – 360 с.
11. Ролдугин В.И. Физикохимия поверхности: учебник-монография. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 568 с.: ил.
12. P. Brain, D.R. Butler // Plant, Cell and Environment. – № 8. – 1985. – P. 247-252.
13. Ворожцов Б.И., Кудряшова О.Б., Ишматов А.Н., Ахмадеев И.Р., Сакович Г.В. // Инженерно-физический журнал, – Т. 83. – № 6. – 2010. – С. 1-20.

## РАСЧЕТ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА И ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ПРОЦЕССЕ ИХ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ

А.А. Кухленко, М.С. Василишин, С.Е. Орлов, Д.Б. Иванова

*Изложена математическая модель разрушения твердых частиц в роторно-пульсационном аппарате. Получены зависимости для расчета дисперсного состава и площади их поверхности в процессе обработки. Проведено сравнение теоретических зависимостей с экспериментальными данными по измельчению различных модельных систем в аппаратах роторно-пульсационного типа.*

*Ключевые слова: роторно-пульсационный аппарат, измельчение, дисперсный состав, площадь поверхности частиц*

Дисперсный состав и площадь поверхности частиц во многом определяют эффективность протекания гидродинамических и массообменных процессов в различных отраслях современной промышленности. Так при мокром измельчении твердых частиц от их размера существенно зависит устойчивость получаемых суспензий. В массообменных процессах (растворение, экстрагирование) и в химических реакциях размер и площадь поверхности частиц определяют время их проведения. Кроме того, в современной химической технологии все большее применение находят аппараты, в которых интенсификация процесса осуществляется с помощью комбинированного воздействия на обрабатываемую среду: активного физического

воздействия при одновременном измельчении сырья. К числу таких аппаратов в полной мере можно отнести аппараты роторно-пульсационного типа (РПА). К сожалению, в настоящее время процесс измельчения твердых частиц в РПА недостаточно полно изучен, что в свою очередь, затрудняет проводить прогнозирование кинетики протекания процессов.

Исходя из этого, представляется актуальным разработать математическое описание процесса мокрого диспергирования твердых частиц различной природы в РПА.

Для разработки такого описания предположим, что частицы исходного сырья однородны и не представляют собой каких-либо агломератов. Кроме того, предположим, что

# РАСЧЕТ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА И ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ПРОЦЕССЕ ИХ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ

разрушение таких частиц происходит только при контакте с рабочими органами аппарата.

Зададимся некоторой функцией плотности исходного массового распределения частиц по размеру, которую обозначим как  $\varphi_0(x)$ , где  $x \in [0, x_{\max}]$ , при этом  $\varphi_0(x)$  – нормирована.

Предположим, что при обработке в РПА частицы, имеющие размеры меньше некоторой величины  $l_{\min}$  не подвергаются измельчению, а частицы, имеющие размеры больше некоторой величины  $l_{\max}$ , измельчаются. Частицы из интервала  $(l_{\min}, l_{\max})$  измельчаются с вероятностью  $\alpha(x)$ , возрастающей от 0 до 1. Соответственно,  $\alpha(x) = 0$  при  $x \leq l_{\min}$  и  $\alpha(x) = 1$  при  $x \geq l_{\max}$ .

Так как начальное положение частицы в аппарате неизвестно, то примем, что частицы равномерно распределены по всему объему обрабатываемой жидкости. В этом случае функцию  $\alpha(x)$  на интервале  $(l_{\min}, l_{\max})$  можно считать линейно возрастающей и определяющейся на указанном интервале по зависимости  $\frac{x - l_{\min}}{l_{\max} - l_{\min}}$ . Таким образом, функция  $\alpha(x)$  определяется по выражению:

$$\alpha(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \leq l_{\min} \\ \frac{x - l_{\min}}{l_{\max} - l_{\min}}, & \text{при } l_{\min} < x < l_{\max} \\ 1, & \text{при } x \geq l_{\max} \end{cases}$$

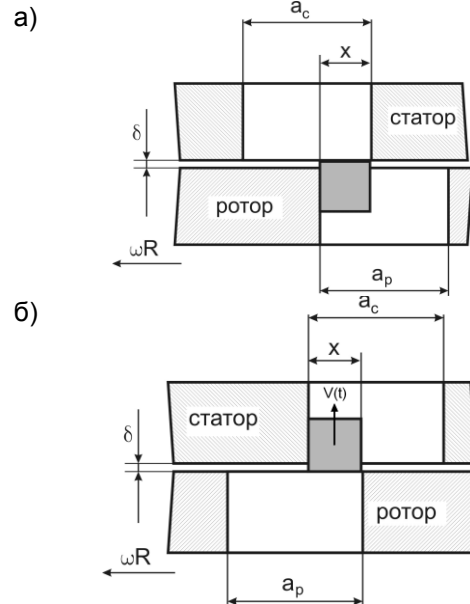
Для твердых частиц  $l_{\min}$  приближенно равно радиальному зазору между ротором и статором ступени аппарата, а  $l_{\max}$  равно длине свободного перемещения частицы через прерыватель РПА частицы размером  $x$ :

$$l_{\max} \approx \frac{dV(t)}{dt} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2} + V_0(t) \cdot \Delta t + l_{\min}, \quad (1)$$

где  $V(t)$  – скорость жидкости через прерыватель РПА в радиальном направлении;  $\Delta t = t_2 - t_1$  – максимально возможное время перемещения частицы размером  $x$  без взаимодействия с рабочими органами аппарата;

$t_1 = \frac{x}{\omega R}$  – момент времени соответствующий началу перемещения частиц с размером  $x$ ;  $t_2 = \frac{a_p + a_c - x}{\omega R}$  – момент времени соответствующий окончанию перемещения частиц размером  $x$ ,  $a_p, a_c$  – ширина каналов ротора и статора,  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора,  $R$  – радиус наружной поверхности ротора.

Характерные положения частиц, соответствующие моментам времени  $t_1$  и  $t_2$ , представлены на рисунке 1.



а) момент времени соответствующий началу свободного перемещения частицы; в) момент времени соответствующий окончанию свободного перемещения частицы

Рисунок 1. Характерные положения частиц

Скорость движения жидкости через прерыватель и моменты времени, соответствующие началу и окончанию перемещения частицы размером  $x$  проиллюстрированы на рисунке 2.

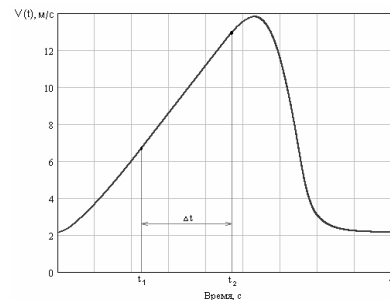


Рисунок 2. Характерное изменение скорости движения частицы через прерыватель РПА за один период совмещения каналов ротора и статора

Так как  $l_{\max}$  является сложной функцией, которая с увеличением размера частиц уменьшается, то функция  $\alpha(x)$  на интервале  $(l_{\min}, l_{\max})$  будет нелинейной (рисунке 3).

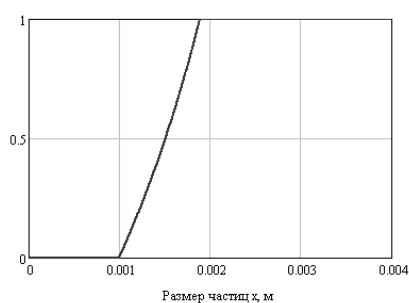


Рисунок 3. Функция вероятности измельчения частицы

Измельчаясь, любая частица размером  $x$  образует новые частицы. Вероятность образования частиц от частицы размером  $x$  может быть описан распределением Розина-Рамлера:

$$\psi(x) = \frac{m}{x_e} \left( \frac{x}{x_e} \right)^{m-1} \exp \left[ - \left( \frac{x}{x_e} \right)^m \right],$$

где  $m$  – параметр, характеризующий свойства материала,  $x_e$  – параметр, характеризующий ступень РПА.

Таким образом, при прохождении частиц через одну ступень РПА дифференциальная функция распределения фракционного состава получаемых частиц запишется в виде:

$$\varphi_1(x) = \int_x^{x_{\max}} \alpha(u) \varphi_0(u) \psi_{10}(x, u) du + (1 - \alpha(x)) \varphi_0(x)$$

где  $\psi_{10}(x, u)$  – нормированная функция плотности распределения для измельчаемой частицы исходного размера  $u$ .

Функция  $\psi_{10}(x, u)$  будет переписана как:

$$\psi_{10}(x, u) = \frac{m}{x_e(u)} \left( \frac{x}{x_e(u)} \right)^{m-1} \times \exp \left[ - \left( \frac{x}{x_e(u)} \right)^m \right], \quad (2)$$

где  $x_e(u) = k \cdot u$  – зависит от исходного размера частицы и коэффициента  $k$ , характеризующего параметры ступени РПА.

После нахождения функция  $\varphi_1(x)$  (приняв ее за исходное распределение) можно получить плотность распределения после второго зазора и таким же образом после любого  $i$ -го зазора:

$$\varphi_i(x) = \int_x^{x_{\max}} \alpha(u) \varphi_0(u) \psi_{i0}(x, u) du + (1 - \alpha(x)) \varphi_0(x) \quad (3)$$

Считая зависимость (3) известной, общую поверхность частиц находим по выражению:

$$S_i = \int_0^{x_{\max}} \frac{\pi \cdot x^2 \cdot m_i}{4} \frac{24}{4 \rho \pi x^3} dx \quad \text{или}$$

$$S_i = \int_0^{x_{\max}} \frac{1,5 M \varphi_i(x)}{\rho x} dx. \quad (4)$$

Проверка работоспособности математической модели осуществлялась на экспериментальных данных опубликованных в работах [1–3]. На рисунке 4 представлены начальное (нормированное) распределение частиц, результат их измельчения в РПА, а также теоретические кривые, построенные по результатам расчета математической модели.

В этих работах в качестве модельных твердых частиц использовались кварцевый песок (рисунок 4а), пенополистирол (рисунок 4б) и сибунит (рисунок 4в). Во всех работах частицы измельчались в многоступенчатых РПА. Следует отметить, что в работах [1–2] проводилась однократная обработка в РПА, а в работе [3] – многократная. Начальное и конечное распределение частиц по размеру были получены авторами [1, 2] с помощью ситового анализа проб, а в работе [3] – микрофотографическим.

Из результатов, представленных на рисунке 4 с учетом точности ситового анализа, видно, что данные, полученные по математической модели, хорошо согласуются с результатами экспериментов.

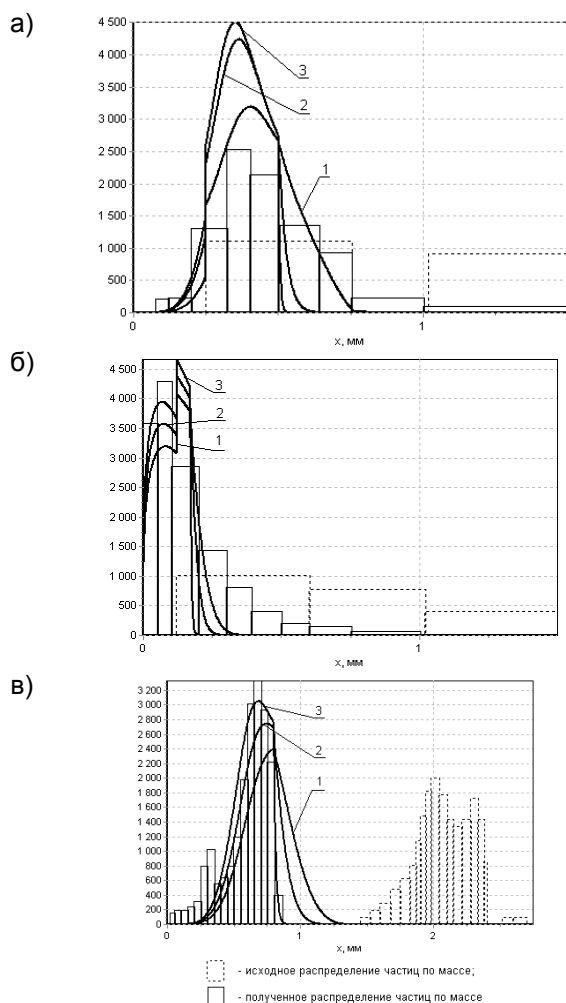
Проиллюстрируем изменение площади поверхности частиц при их измельчении в РПА на примере результатов расчета математической модели и исходных данных работы [3].

Обозначим начальную площадь поверхности частиц как  $S_0$ . Согласно выражениям (2) и (3), и используя данные работы [3], изменение площади поверхности частиц будет меняться по кривой, представленной на рисунке 5.

Из рисунка 5 видно, что основное измельчение происходит на первых циклах обработки исходного материала, который с увеличением кратности обработки все меньше и меньше подвергается диспергированию. Это полностью соответствует общим представлениям о протекании процесса разрушения твердых частиц в РПА.

Таким образом, разработанная математическая модель процесса измельчения частиц твердой фазы в РПА позволяет прогнозировать дисперсный состав получаемых частиц и определять площадь получаемой поверхности контакта фаз.

# РАСЧЕТ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА И ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ПРОЦЕССЕ ИХ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ



1 – расчетная кривая соответствующая однократной обработке твердых частиц в РПА; 2 – расчетная кривая соответствующая двукратной обработке твердых частиц в РПА; 3 – расчетная кривая соответствующая десятикратной обработке твердых частиц в РПА

Рисунок 4. Сравнение результатов расчета по математической модели с экспериментальными данными

В разработанной модели выполнено описание функции  $\alpha(x)$  на интервале  $(l_{\min}, l_{\max})$  и показано, что она имеет нелинейный характер. Определено, что в зависи-

мости (2) коэффициент  $\chi_e$  меняет свое значение при интегрировании в линейной зависимости от текущего размера частицы. Полученная математическая модель может быть использована для описания изменения размера и площади поверхности частиц при расчете гидродинамических и массообменных процессов в аппаратуре роторно-пульсационного типа.

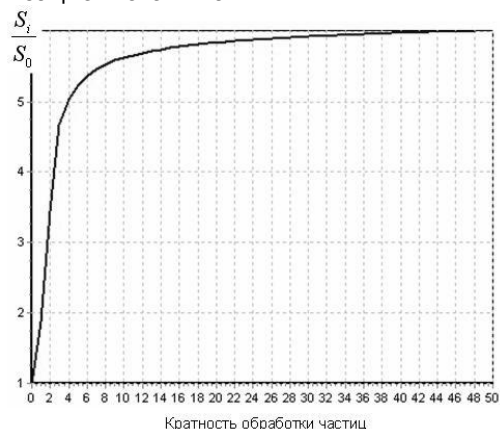


Рисунок 5. Изменение площади поверхности частиц от кратности обработки

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балабудкин М.А., Барам А.А. // ТОХТ. – 1971. – Т. 52, № 3. – С. 932-935.
2. Балабудкин М.А., Барам А.А. // Сборник статей «Машины, процессы и оборудование целлюлозно-бумажных производств». – ЛТИЦБП, Ленинград. – 1973. - Вып. 29, С.107-112.
3. Иванов О.С., Василишин М.С., Ахмадеев И.Р., Бычин Н.В., Лапина Ю.Т. // Сборник материалов XII научно-практической конференции «Химия XXI век: новые технологии, новые продукты». – 2009. – С. 51-53.