

СМЕЖНЫЕ ОБЛАСТИ

УДК 628.3

К ВОПРОСУ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РАСТВОРЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ

Д.Б. Иванова¹, М.С. Василишин¹, А.Г. Овчаренко²

Проведено экспериментальное исследование процесса растворения бензойной и салициловой кислот в воде с применением роторно-пульсационного аппарата. Установлены факторы, влияющие на интенсификацию растворения дисперсных материалов.

Ключевые слова: растворение, роторно-пульсационный аппарат, бензойная кислота, салициловая кислота, радиальный зазор, частота вращения ротора.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс растворения дисперсных твердых материалов применяется во многих отраслях промышленности, таких как химическая, фармацевтическая, биотехнологическая и др. Вместе с тем растворимость индивидуальных веществ, используемых в различных технологических процессах, может быть существенно различной. Интенсификация растворения в этом случае достигается за счет оптимизации межфазного взаимодействия и применения принципиально новых образцов специализированного оборудования.

Обычно для обеспечения приемлемых скоростей растворения твердый дисперсный материал дополнительно измельчают. В случае растворения, не осложненного экранированием реакционной поверхности, максимальная поверхность контакта фаз достигается разобщением частиц твердой фазы на расстояния, превышающие толщину пограничного гидродинамического слоя.

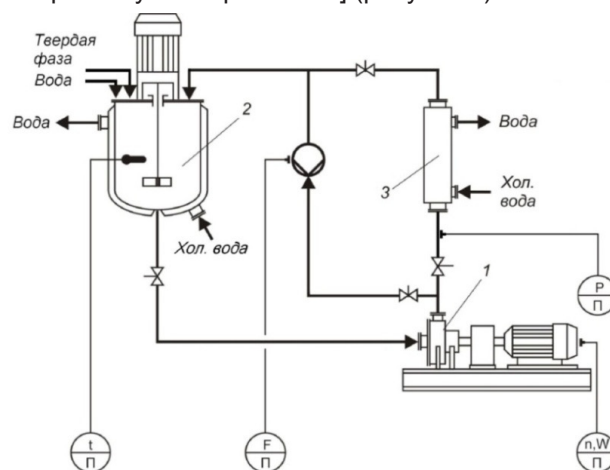
Для этих целей в промышленности широкое применение находят роторно-пульсационные аппараты (РПА), в которых реализуется прин-

цип многофакторного воздействия на обрабатываемую среду. В таких устройствах растворение интенсифицируется за счет увеличения межфазной поверхности и одновременного повышения коэффициентов массопереноса вследствие улучшения условий отвода вещества от твердой поверхности в раствор [1-3].

Цель настоящей работы – исследование влияния режимных параметров обработки в РПА на интенсификацию процесса растворения дисперсных материалов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Известно [4, 5], что режим растворения может быть диффузионным, кинетическим и смешанным. Переход от одного режима к другому зависит от изменения температуры, концентрации растворителя и его активности, а также от интенсивности перемешивания. Исследование влияния отдельных технологических параметров процесса и конструктивных особенностей оборудования на кинетику растворения модельных систем проводилось в установке полупромышленного масштаба [6, 7] (рисунок 1).



1 – РПА; 2 – ёмкостной аппарат с перемешивающим устройством; 3 – теплообменник

Рисунок 1 – Принципиальная схема полупромышленной установки

СМЕЖНЫЕ ОБЛАСТИ

В качестве объектов исследования были выбраны бензойная кислота квалификации «Ч» и техническая салициловая кислота, отличающиеся сравнительно низкой растворимостью в воде.

Для растворения использовали дистиллированную воду. Температура воды во всех сериях опытов составляла 20 – 21 °С. Фракционный состав исследуемых материалов определяли при помощи оптического анализатора размеров частиц PIP 9.1 (Китай).

Концентрацию растворенного вещества в пробах определяли кондуктометрическим методом при помощи кондуктометра-концентраметра АНИОН-7025 (Россия). Эксперименты проводили при различных величинах радиального зазора δ между ротором и статором РПА ($0,5 \cdot 10^{-3}$ м, $1 \cdot 10^{-3}$ м, $2 \cdot 10^{-3}$ м).

Модельные материалы в количествах, необходимых для получения насыщенных водных растворов, загружали при работающем

РПА в емкость с перемешивающим устройством. При этом перемешивающее устройство не включалось с целью исключения возможности первичного растворения материала при его загрузке. В процессе движения суспензии по циркуляционному контуру происходило растворение дисперсной твердой фазы.

Далее, через определенные интервалы времени, из циркуляционного контура установки отбирали пробы раствора, фильтровали с целью отделения нерастворившихся кристаллов и измеряли величину УЭП фильтрата.

Важнейшим конструктивным параметром РПА, оказывающим значительное влияние на кинетику растворения является величина радиального зазора (δ) между цилиндрами ротора и статора. Рисунки 2 и 3 иллюстрируют влияние указанного параметра на кинетику растворения бензойной и салициловой кислот в установке с полупромышленным РПА.

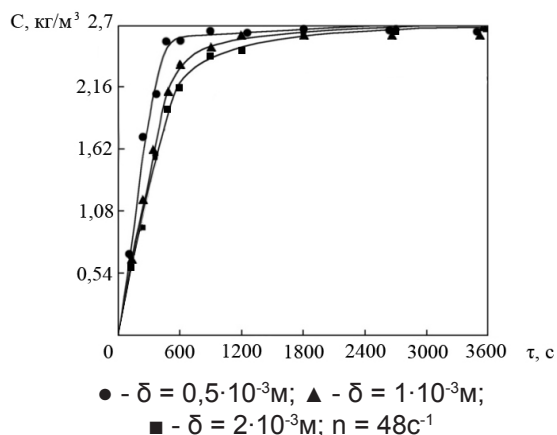


Рисунок 2 – Влияние величины радиального зазора δ на кинетику растворения бензойной кислоты в полупромышленном образце РПА

Как следует из полученных зависимостей, с уменьшением δ процесс растворения интенсифицируется, что, очевидно, связано с возрастанием градиента скорости жидкости в зазоре и соответствующим усилением дробления частиц за счет гидродинамических сил потока. Линейная скорость обрабатываемой среды изменяется от нуля на границе с поверхностью статора, до значения тангенциальной скорости вращения ротора. Именно в этой зоне имеет место наибольшая диссипация подводимой энергии [8], и в ней происходит наиболее сильное разрушающее воздействие на дисперсные частицы.

В [9] предлагается определять величину

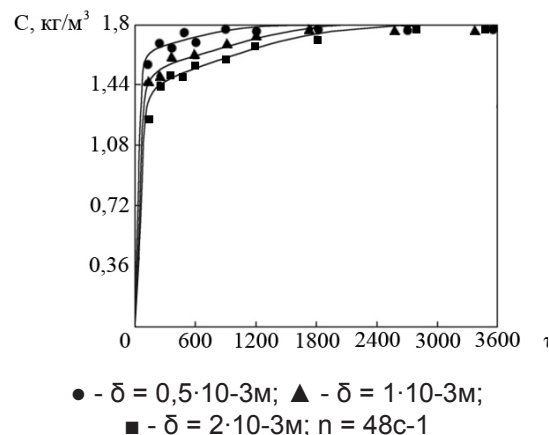


Рисунок 3 – Влияние величины радиального зазора δ на кинетику растворения салициловой кислоты в полупромышленном образце РПА

ну сдвиговой скорости в радиальных зазорах РПА при помощи зависимости:

$$G = \frac{R\omega}{\delta}, \quad (1)$$

где R – радиус наружной поверхности соответствующего цилиндра ротора, м;

ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с.

Напряжения, возникающие при сдвиговом течении в радиальных каналах, могут быть определены в соответствии с законом Гука [10]:

$$\sigma = \frac{P}{0,5F_{\pm}}, \quad (2)$$

СМЕЖНЫЕ ОБЛАСТИ

где p – сила, действующая на частицу со стороны потока, Н;

F_v – площадь среднего (миделева) сечения частицы плоскостью, перпендикулярной потоку, м².

Численное значение величины p определяется выражением:

$$p = \xi \rho_{\text{ж}} F_v^2 G^2, \quad (3)$$

где ξ – коэффициент гидродинамического сопротивления;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность сплошной среды (жидкости), кг/м³.

Коэффициент гидродинамического сопротивления может быть найден по зависимости:

$$\xi = 2,25 \left(\frac{16}{Re} + \frac{2,2}{Re^{0,5}} + 0,6 \right), \quad (4)$$

где $Re = \frac{\rho_{\text{ж}} GR^2}{\mu}$ – критерий Рейнольдса для сдвиговых течений.

В таблице 1 представлены значения напряжений, возникающих при сдвиговом течении в радиальных кольцевых зазорах полупромышленного образца РПА, для случая растворения бензойной и салициловой кислот.

Расчет выполнен по зависимостям (1 – 4) при $\omega = 300$ рад/с; $d_v = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м и $\mu = 1,005 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Таблица 1 – Напряжения, возникающие при сдвиговом течении в радиальных зазорах полупромышленного образца РПА

Радиальный зазор между цилиндрами ротора и статора $\delta \cdot 10^3$, м	Радиус наружной поверхности цилиндра 1 $R_1 \cdot 10^3$, м	Напряжения, возникающие в радиальном зазоре 1 σ_1 , кПа	Радиус наружной поверхности цилиндра 2 $R_2 \cdot 10^3$, м	Напряжения, возникающие в радиальном зазоре 2 σ_2 , кПа
0,5	57,0	24,8	71,0	38,0
1,0		6,19		9,6
2,0		1,56		2,4

Как следует из данных таблицы 1 при минимальных значениях межцилиндрового зазора δ , в потоке обрабатываемой среды возникают максимальные растягивающие напряжения, способные вызвать разрушение частиц дисперсного материала. При этом увеличивается межфазная поверхность и интенсифицируется процесс растворения, что под-

тверждается экспериментальными данными.

Технологическим параметром, оказывающим влияние на кинетику растворения модельных материалов в РПА, является и частота вращения его ротора. Влияние частоты вращения на кинетику растворения бензойной и салициловой кислот в установке с полупромышленным РПА показано на рисунках 4 и 5.

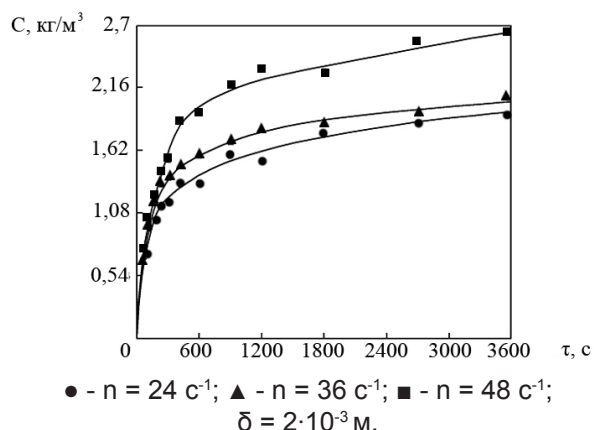


Рисунок 4 – Влияние частоты вращения ротора на кинетику растворения бензойной кислоты в полупромышленном образце РПА

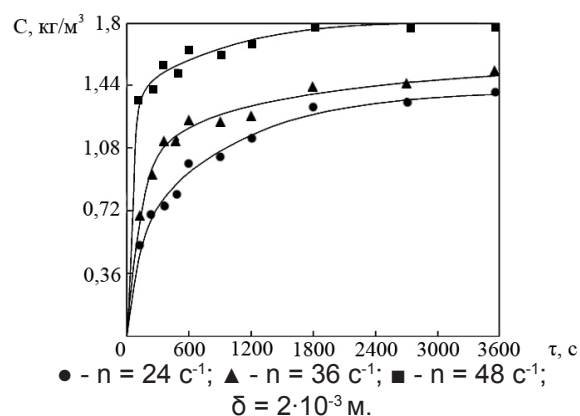


Рисунок 5 – Влияние частоты вращения ротора на кинетику растворения салициловой кислоты в полупромышленном образце РПА

СМЕЖНЫЕ ОБЛАСТИ

Установлено, что при прочих равных условиях, повышение частоты вращения улучшает расходно-напорные характеристики аппарата. При этом повышается кратность прохождения обрабатываемой среды через рабочие органы РПА и тем самым интенсифицируется процесс растворения дисперсной твердой фазы.

Течение через радиальные каналы цилиндров ротора и статора РПА носит ярко выраженный нестационарный характер. Оценим некоторые осредненные характеристики этого течения. В [10] показано, что среднее значение радиальной скорости обрабатываемой среды можно представить в виде:

$$\bar{v}_P = \frac{Q}{z \cdot a \cdot h} \quad (5)$$

где Q – объемный расход обрабатываемой среды, м³/с;

z – количество радиальных каналов в цилиндрах ротора и статора;

a – ширина канала, м;

h – высота канала, м.

При работе РПА происходит периодическое перекрытие радиальных каналов на роторе и статоре. Характерное время, в течение которого осуществляется открытие или закрытие единичного канала составляет:

$$\tau_{o-z} = \frac{a}{\bar{v}_T}, \quad (6)$$

где \bar{v}_T – среднее значение тангенциальной скорости соответствующего цилиндра ротора, м/с.

Характерное время, в течение которого канал статора находится в полностью закрытом состоянии:

$$\tau_{nz} = \frac{b-a}{\bar{v}_T}, \quad (7)$$

где b – расстояние между двумя соседними каналами, м.

В результате перекрытия радиальных каналов в них возникают многократно повторяющиеся гидравлические удары. Средняя амплитуда импульсов давления, возникающего в результате таких ударов определяется зависимостью:

$$\Delta P_{cp} = \frac{2\rho\bar{v}_T l}{\tau_{o-z}} \quad (8)$$

где l – длина канала ротора (статора), м.

Расчет по зависимостям (5 – 8) при $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м дает следующие значения осредненных характеристик течения обрабатываемой среды, представленных в таблице 2.

Таблица 2 – Осредненные характеристики течения обрабатываемой среды через радиальные каналы полупромышленного образца РПА

Частота вращения ротора n , с ⁻¹	Расход обрабатываемой среды, $Q \cdot 10^3$, м ³ /с	Радиальная скорость обрабатываемой среды \bar{v}_P , м/с		Продолжительность открытия-закрытия канала τ_{o-z} , мс		Продолжительность нахождения в закрытом состоянии τ_{nz} , мс		Амплитуда импульсов давления ΔP_{cp} , кПа	
		1	2	1	2	1	2	1	2
24,0	1,92	0,85	0,64	9,5	7,9	0,38	0,12	0,89	0,81
36,0	2,94	1,31	0,98	7,2	5,9	0,29	0,09	1,82	1,66
48,0	3,67	1,63	1,22	5,8	4,7	0,23	0,07	2,81	2,60

Как видно из таблицы 2, увеличение частоты вращения ротора РПА интенсифицирует процесс растворения за счет увеличения абсолютной величины импульсов давления, возникающих в радиальных каналах аппарата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

Величина радиального кольцевого зазора между цилиндрами ротора и статора (δ), а также частота вращения ротора (n) оказывают наибольшее влияние на кинетику растворения бензойной и салициловой кислот в РПА.

Растворение указанных материалов целесообразно проводить в две стадии. На первой, длительностью 10 – 15 минут, обработку следует осуществлять при максимальной частоте вращения ротора аппарата ($n = 48$ с⁻¹). На завершающей стадии обработки частота может быть снижена до 25 с⁻¹.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксельруд, Г.А. Растворение твердых веществ / Г.А. Аксельруд, А.Д. Молчанов. – М.: Химия, 1977. – 267 с.
2. Балабудкин, М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности / М.А. Балабудкин. – М.: Медицина, 1983. – 160 с.

3. Промтов, М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика / М.А. Промтов. – М.: Машиностроение – 1, 2001. – 260 с.

4. Кафаров, В.В. Основы массопередачи: учебник для студентов вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. / В.В. Кафаров. – М.: Высш. Школа, 1979. – 439 с.

5. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. – 3-е изд.: в 2-х кн.: Массообменные процессы и аппараты. – М.: Химия, 2002. – книга 2. – 368 с.

6. Иванова, Д.Б. Кинетика массообмена при растворении дисперсных материалов в роторно-пульсационном аппарате / Д.Б. Иванова, М.С. Василишин, А.А. Кухленко, О.С. Иванов, С.Е. Орлов, А.Г. Карпов // Химическая технология. - № 2. – 2013. – С. 100 – 103.

7. Иванова, Д.Б. Исследование массообмена при растворении дисперсных материалов в аппаратуре роторно-пульсационного типа / Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы 4-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, 27 – 29 апреля 2011 г., г. Бийск: Изд-во Алтайского государственного технического университета, 2011. – С. 49–53.

8. Орлов, С. Е. Закономерности течения жидкости в роторно-пульсационном аппарате / С.Е. Орлов, А.А. Кухленко, М.С. Василишин, Д.Б. Иванова // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы 3-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, 28-30 апреля 2010г., г. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-т, 2010. – часть 1. С. 26–29.

9. Долинский, А.А. Использование механизмов ДИВЭ при роторно-пульсационной обработке

гетерогенных сред / А.А. Долинский, Г.К. Иваницкий, А.Н. Ободович // Промышленная теплотехника. – Т. 30. – № 4. – 2008. – С. 5 – 13.

10. Долинский, А.А. Оценка эффектов диспергирования включений в роторно-пульсационном аппарате дисково-цилиндрического типа / А.А. Долинский, Б.И. Басок, Т.Л. Грабова // Промышленная теплотехника. – Т. 28. – № 6. – 2006. – С. 37 – 43.

Иванова Дарья Борисовна, младший научный сотрудник лаборатории Процессов и аппаратов химических технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), 659322, Алтайский край, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, (3854) 30-18-69, сот. 8-913-369-34-59, ivanovadasha84@mail.ru.

Василишин Михаил Степанович, заведующий лабораторией Процессов и аппаратов химических технологий, кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), 659322, Алтайский край, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, (3854) 30-18-37.

Овчаренко Александр Григорьевич, декан механического факультета, доктор технических наук, профессор Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ), 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Трофимова, 27, 8-(3854) 43-22-84, shura@bti.secna.ru.

УДК 621.647.23

ИССЛЕДОВАНИЕ БРЫЗГОУНОСА В РОТОРНОМ РАСПЫЛИТЕЛЬНОМ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕ

А.Ф. Сорокопуд¹, К.Б. Плотников¹, Д.В. Резик¹, Д.Б. Иванова²

Представлены результаты экспериментальных исследований брызгоуноса в роторном распылителе пылеуловителе с внутренней циркуляцией и самоорошением жидкостью. Получены закономерности брызгоуноса от основных параметров – скорости газа, скорости истечения жидкости из отверстий, диаметра распыливающих отверстий.

Ключевые слова: брызгоунос, скорость газа, частота вращения распылителя, диаметр отверстий.

Одной из проблем при конвективной сушке пищевых полуфабрикатов являются потери, связанные с уносом частиц продукта с газами [1]. Для минимизации потерь используют различное пылеулавливающее оборудование. Циклоны улавливают частицы размерами бо-

лее 10 мкм на 92–98 %. Эффективность улавливания частиц меньшего размера снижается по мере уменьшения их эквивалентного диаметра. Поэтому циклоны являются, как правило, первой ступенью очистки. Рукавные фильтры улавливают частицы пыли размерами 1 мкм и