

УДК 66.063.3.023.3

О некоторых вопросах механизма дробления и массопередачи в пульсационных экстракционных колоннах

АХАРОВ Е. И., КАРПАЧЕВА С. М. *

Известно, что размер капель d_k^* в колоннах-экстракторах определяет основные технологические показатели аппарата: удельную производительность ($W \sim \bar{v}_0 \sim \bar{d}_k$), эффективность (ВЭП $\sim \Omega/d_k$) и скорость разделения фаз в отстойниках ($v_p \sim d_k, h_2$).

Для дробления капли на две равные части необходимо затратить энергию

$$E_k = C \pi \sigma d_k^2. \quad (1)$$

Энергия может быть подведена с помощью вращающихся дисков, мешалок (колонны с механическим подводом энергии), возвратно-поступательного движения тарелок (вибрационные колонны) или сплошной фазы (пульсационные колонны).

Дробление дисперсной фазы в экстракционных колоннах может произойти в ядре потока сплошной фазы в результате турбулентных «пульсаций» скорости сплошного реагента (изменение скорости на противоположных концах капли — ΔU), вызванных возвратно-поступательным движением сплошной фазы, изменением скоростного напора в отверстиях, каналах насадки, а также у стенок колонны, поверхности насадки (кольца, тарелки) при изменении скорости потока и при ударе капли о поверхность насадки.

Для выяснения механизма дробления дисперсной фазы в пульсационных колоннах проведена фото- и киносъемка различных участков модельной колонны (площадь сечения 176×176 мм; $H_k = 1,2$ м), заполненной наиболее широко применяемыми типами насадок (табл. 1).

Исследования проводили на системе 20%-ный трибутилфосфат (ТБФ) в керосине (фракция, кипящая при $t = 170 \div 240^\circ \text{C}$) + $0,1-0,2 \text{ M HNO}_3$ в воде ($\sigma = 12$ дин/см, $\rho_c = 1$ г/см³, $\Delta \rho = 0,21$ г/см³, $\mu_d = 1,65$ сП).

Оказалось, что в пульсационных колоннах с ситчатыми тарелками и насадкой типа КРИМЗ дробление дисперсной фазы происходило в ядре потока сплошной фазы на входе и выходе из отверстий. При использовании КРИМЗ стабильный размер капель наблюдался по высоте

колонны практически после трех тарелок по ходу движения диспергируемого реагента.

Величина капли определялась типом насадки, интенсивностью пульсации и свойствами систем (рис. 1). Варьируя $I = fa$, можно получить заданный d_k практически на любой системе [1, 2]. Так как согласно теории [3] энергия, необходимая для дробления капли, может быть выражена соотношением

$$E_k = C_p \Delta U^2 d_k^3, \quad (2)$$

то для случаев, когда изменение скорости ΔU обусловлено силами инерции или вязкости [3, 4], соответственно

$$\Delta U^2 = C_1 \varepsilon^{2/3} d_k^{2/3}; \quad (3)$$

$$\Delta U^2 = C_2 \varepsilon \rho_c d_k^2 / \mu. \quad (4)$$

С учетом приведенных выражений для дробления дисперсной фазы в пульсационных

* Во всех случаях C_{1-6} — разные коэффициенты.

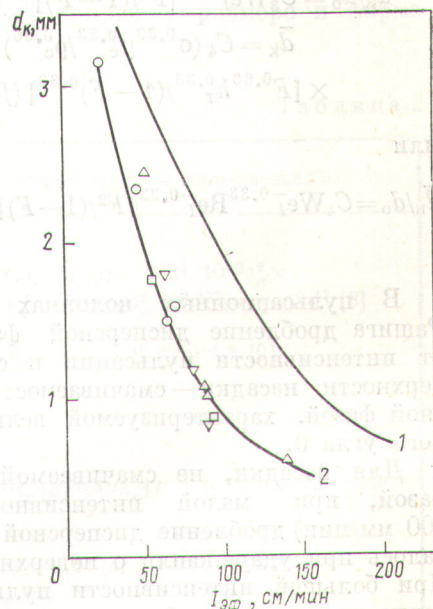


Рис. 1. Зависимость диаметра капли от интенсивности пульсации:

1 — кольца Рашига размером $10 \times 10 \times 0,4$ и $25 \times 25 \times 0,8$ мм (данные работы [7]); 2 — насадка КРИМЗ, частота пульсации 100 (O); 176 (Δ); 310 (▽), 360 мин⁻¹ (□)

* Условные обозначения см. в конце статьи.

Характеристики исследования насадок из нержавеющей стали

Таблица 1

Тип насадки	Геометрия насадки	Способ заполнения
Кольца Рашига Ситчатые тарелки КРИМЗ *	$10 \times 10 \times 0,4$ мм; $\varepsilon_n = 0,82$ $25 \times 25 \times 0,8$ мм; $\varepsilon_n = 0,866$ $d_o = 3,2$ мм; $F = 20 \div 25\%$ Отверстия 10×20 мм, $\alpha = 10 \div 45^\circ$; $F = 20 \div 43\%$	Сплошная засыпка, секционная с разрывами $0,05-0,2$ мм $h_T = 50$ мм $h_T = 50 \div 200$ мм

* Авт. свид. СССР № 175489, кл. 12 g 401. — «Бюл. изобрет.», 1965, № 20, с. 18; КРИМЗ — начальные буквы фамилий авторов насадки.

колоннах с ситчатыми тарелками и КРИМЗ получаем

$$\bar{d}_k = \text{const} (\sigma/\rho_c)^{0,6} \varepsilon^{-0,4}; \quad (5)$$

$$\bar{d}_k = \text{const} (\sigma\mu/\rho_c^2 \varepsilon)^{0,33}. \quad (6)$$

Как известно [5], для тарельчатых колонн ε определяется соотношениями

$$\varepsilon = \pi^2 (1-F) (fa)^3 / 2C_0^2 F^2 h_T; \quad (7)$$

$$\bar{d}_k = C_3 (\sigma/\rho_c)^{0,6} [F^{0,8} h_T^{0,4} / (1-F)^{0,4}] (fa)^{-1/2}, \quad (8)$$

или

$$\bar{d}_k/d_o = C_3 We_I^{-0,6} [F^2/(1-F)]^{0,4} (h_T/d_o)^{0,4}; \quad (9)$$

$$\bar{d}_k = C_4 (\sigma^{0,33} \mu_c^{0,33} / \rho_c^{0,66}) \times [F^{0,66} h_T^{0,33} / (1-F)^{0,33}] (fa)^{-1,0}, \quad (10)$$

или

$$\bar{d}_k/d_o = C_4 We_I^{-0,33} Re_I^{-0,33} [F^2/(1-F)]^{0,33} (h_T/d_o)^{0,33}. \quad (11)$$

В пульсационных колоннах с кольцами Рашига дробление дисперсной фазы зависело от интенсивности пульсации и состояния поверхности насадки — смачиваемости ее дисперсной фазой, характеризуемой величиной краевого угла θ .

Для насадки, не смачиваемой дисперсной фазой, при малой интенсивности (100 — 200 мм/мин) дробление дисперсной фазы наблюдалось при ударе капли о поверхность кольца. При большей интенсивности пульсации дробление происходило вблизи поверхности колец.

В этом случае по теории [6,7]

$$d_k \sim (\sigma v_p / \rho_c v_p^3)^{0,5}, \quad (12)$$

где v_p — скорость турбулентных пульсаций.

Принимая $v_p \approx fa$, получаем

$$\bar{d}_k = C_5 (\sigma/\rho_c)^{0,5} \mu_c^{0,5} (fa)^{-1,43} \quad (13)$$

или

$$\bar{d}_k/d_n = C_5 We_I^{-0,5} Re_I^{-0,5}. \quad (14)$$

Для насадок, смачиваемых дисперсной фазой, характер движения и дробления дисперсной фазы несколько иной. Дисперсная фаза двигалась по кольцам в виде пленки, капли образовывались только в пустотах колец или в разрывах насадки. При малой интенсивности дробление происходило при стекании дисперсной фазы с колец, а при большой — в потоке. В последнем случае, очевидно, величина капель может быть описана следующим выражением:

$$\bar{d}_k/d_n = C_6 We_I^{-0,6} [\varepsilon_n^2/(1-\varepsilon_n)]^{0,4} (d_{экр.н}/\bar{d}_n)^{0,4}, \quad (15)$$

или

$$\bar{d}_k/d_n = C_6 We_I^{-0,33} Re_I^{-0,33} [\varepsilon_n^2/(1-\varepsilon_n)]^{0,33} \times (d_{экр.н}/d_n)^{0,33}. \quad (16)$$

Таким образом, для расчета $\bar{d}_k$ имеем:

для тарельчатых пульсационных колонн

$$\bar{d}_k \sim (\sigma/\rho_c)^{0,33 \div 0,6} \mu_c^{-0,33} (fa)^{-(1,0 \div 1,2)}; \quad (17)$$

для насадочных пульсационных колонн

$$\bar{d}_k \sim (\sigma/\rho_c)^{0,33 \div 0,6} \mu_c^{0 \div 0,5} (fa)^{-(1,0 \div 1,43)}. \quad (18)$$

В табл. 2 приведены экспериментальные (опубликованным данным) соотношения, использованные для расчета диаметра капель в пульсационных колоннах. Видно, что теоретические выражения для расчета $\bar{d}_k$ [см. уравнения (17)

* $C_0 = 0,6$ — коэффициент сужения потока [5].

и (18)], полученные при анализе механизма дробления, достаточно надежно согласуются с экспериментальными соотношениями.

Как известно [12], возвратно-поступательное колебание реагентов (пульсация) в 5—10 раз увеличивает эффективность работы колонного экстрактора (рис. 2). О механизме интенсификации процесса в пульсационных экстракторах сведения противоречивы. Это объясняется ростом коэффициента массопередачи в результате турбулизации поверхности капли [13—16] или поверхности контакта фаз [12, 17]. Анализ процесса массопередачи в пульсационных колоннах требует наличия данных о дроблении (форма и размер капель), о распределении и структуре потоков в аппарате (равномерность распределения фаз, продольное перемешивание) и о величине эффективности. Как правило, в предыдущих исследованиях это условие не выполнялось.

Нами рассмотрен вопрос при анализе гидродинамических и технологических характеристик модельной пульсационной колонны с насадкой КРИМЗ на системе 20% ТБФ в керосине + 30—35 г/л U + 0,1 M HNO₃, характеризующей $\alpha_m n \approx 1$.

На основе экспериментальных данных по продольному перемешиванию и эффективности были рассчитаны величины ВЕП, обусловленные только массопередачей (ВЕП_м), для раз-

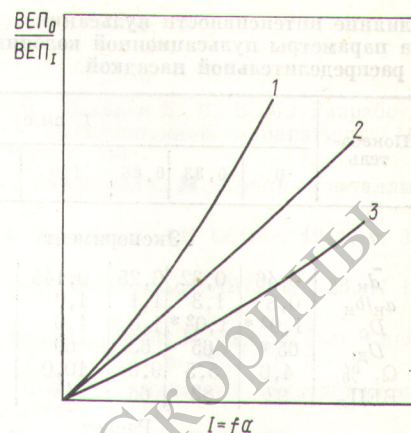


Рис. 2. Влияние интенсивности пульсации ($l = fa$) на эффективность работы пульсационной колонны для различных режимов работы аппарата:

1, 2, 3 — при $I_1 > I_2 > I_3$

личных режимов пульсации:

$$\text{ВЕП}_m = \text{ВЕП}_n - \text{ВЕП}_{\text{доб}}, \quad (19)$$

где

$$\text{ВЕП}_{\text{доб}} = \lambda (D_c/W_c^* + D_d/W_d^*). \quad (20)$$

Для изученной системы с $\alpha_m n \approx 1$ принято, что $\lambda = 1$. Величины W^* рассчитывали по формулам

$$W_c^* = W_c / (1 - \Omega); \quad W_d^* = W_d / \Omega. \quad (21)$$

Затем, используя данные о размере и форме

Корреляционные уравнения для d_K (эксперимент)

Таблица 2

Характеристика системы	Характеристика насадок	Экспериментальное соотношение
Насадочная колонна		
$\sigma = 5,8 \div 50$; $\rho_c = 0,998 \div 1,084$; $\rho_d = 0,67 \div 0,81$; $\mu_c = 1 \div 2,9$; $\mu_d = 0,4 \div 4,2$	Кольца Рашига (керамика) $7,76 \times 25$ мм; $\varepsilon_n = 0,54 \div 0,77$	$d_{K\rho c}(fa)/\mu_c = 2,21 \cdot 10^{-2} \varepsilon_n^2 \times$ $\times (\sigma \rho_c \mu_n / \mu_c^2)^{0,526} (\Delta \rho g d_n^2 / \sigma)^{0,177} (\mu_d / \mu_c)^{0,17}$ [8]
$\sigma = 12$, $\rho_c = 1,02$; $\rho_d = 0,796$; $\rho_c = 1,02$; $\mu_d = 1,65$	Кольца Рашига (нержавеющая сталь) $10 \times 10 \times 0,5$ мм; $25 \times 25 \times 0,8$ мм	$\bar{d}_K = C (\sigma / \rho_c)^{0,5} (fa)^{-1,4}$ [9]
Ситчатая колонна		
$\sigma = 1,08 \div 37$; $\rho_c = 0,99 \div 1,0$; $\rho_d = 0,8 \div 0,958$; $\mu_c = 1 \div 1,2$	$d_o = 5 \div 10$ мм; $h_T = 0,25$ мм; $F = 0,14 \div 0,61$	$\bar{d}_K = 0,439 d_o [\sigma F^{0,5} / (5,1 fa + W_c)^2 \rho_c d_o]^{0,6}$ [10]
Метилизобутилкетон—вода	—	$\bar{d}_K = 0,81 (af/h_T^{0,33})^{-1,2}$ [11]
Колонна с насадкой КРИМЗ		
$\sigma = 6 \div 24$; $\rho_c = 1 \div 1,25$; $\rho_d = 0,6 \div 1,0$; $\mu_c = 1 \div 1,2$; $\mu_d = 1,2 \div 6$	$h_T = 50 \div 250$ мм; $\alpha = 10 \div 45^\circ$; отверстия $10 \times 20 - 70 \times 140$ мм	$\bar{d}_K = 0,135 F (\sigma / \rho_c)^{0,6} (fa)^{-1,0}$; $F = 4a^2 \sin \alpha (2 + \cos \alpha) N_{\text{отв}} / \pi D_T^2$ [12]

Влияние интенсивности пульсации на параметры пульсационной колонны с распределительной насадкой

Таблица 3

Показатель	I, см/с						
	0	0,33	0,66	1,0	1,73	2,0	2,33
Эксперимент							
$\bar{d}_K$	0,46	0,32	0,25	0,145	0,10	0,08	0,06
a_K/b_K	0,8	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
D_c	1,02*	1,02*	1,0	1,0	1,5	2,0	2,5
D_d	65*	65	65	60	24	12	6
$\Omega, \%$	4,6	5,5	9,0	10,0	23	30	24
ВЕП _д	92	82	66	48	45	21	22,5
Расчет							
S	60	100	180	452	1390	1800	2400
W_c^*	10,5	10,6	11	11,2	13,0	14,3	9,9
W_d^*	218	181	111	100	43	33	21
ВЕП _{доб}	12	16,4	22	24,8	24,1	17,8	19,3
ВЕП _м	80	65,6	44	23,2	20,9	3,2	3,5
K_a	1,0	1,22	1,81	3,43	3,8	25,0	22,9
K_s	1	1,66	3,00	7,53	23,1	30	40
K_M	1,0	0,735	0,6	0,465**	0,165**	0,83	0,57

 * Принято для $I = 0,66$ см/с.

 ** Существенное изменение K_M при переходе от $I = 1$ см/с к $I = 1,73$ см/с связано, очевидно, с неточностью измерения ВЕП_д в этом режиме пульсации.

капель, величине задержки дисперсной фазы, определяли фактор массопередачи $K_M = K_a/K_s$ [17, 18]:

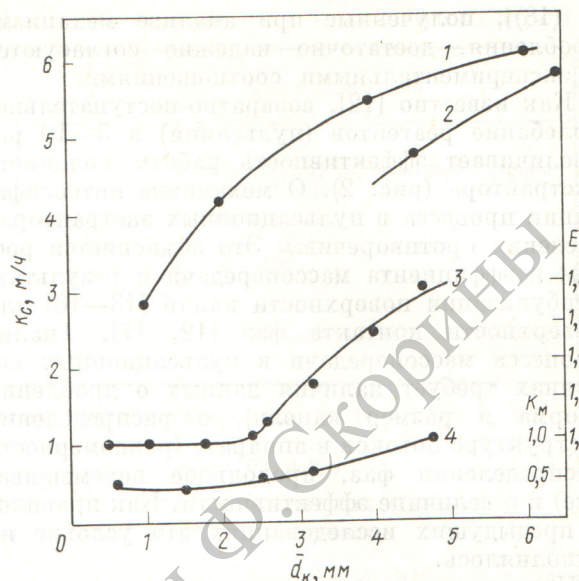
$$K_M = (ВЕП_{м0}/ВЕП_{мI})(S_0/S_I) = K_a/K_s \quad (22)$$

Результаты анализа представлены в табл. 3, а влияние размера капли (интенсивности пульсации) на K_M показано на рис. 3.

Как видно из табл. 3, коэффициент массопередачи уменьшается с ростом интенсивности пульсации, т. е. интенсификация процесса в пульсационных экстракционных колоннах обусловлена только ростом поверхности контакта фаз.

Коэффициент интенсивности составляет $(0,45 \div 0,5)K_a$, что говорит о существенном снижении коэффициента массопередачи при пульсации (см. рис. 3, кривые 1, 4). Указанное изменение коэффициента массопередачи можно объяснить изменением формы капли (кривые 3, 4 на рис. 3). Действительно, при увеличении интенсивности пульсации уменьшается размер капли, при этом капля приобретает сферическую форму. В крупных каплях несферической формы при $d_K > d_{K, \text{сфер}}$

$$d_{K, \text{сфер}} \leq (\sigma/\Delta\rho g)^{0,5} \quad (23)$$


 Рис. 3. Зависимость коэффициента массопередачи K_0 , фактора формы капли E и фактора массопередачи K_M от d_K :

1 и 2 — изменение K_0 для насадочной пульсационной колонны с кольцами Рашига [6] и одиночной капли, движущейся в пустотелой колонне соответственно; 3 и 4 — изменение E ($E = a_K/b_K$) и K_M в пульсационной колонне с насадкой КРИМЗ соответственно.

Наблюдается внутренняя циркуляция экстрагируемого вещества, что обуславливает большие значения K (см. кривую 2 на рис. 2). В каплях сферической формы вещество в ядро капли проникает только в результате молекулярной диффузии. Возвратно-поступательное колебание сплошной фазы способствует диффузии вещества в ней (турбулентная диффузия), не сказываясь на диффузии в каплях сферической формы, в которой может наблюдаться только циркуляция вещества в пограничной зоне.

Поступила в Редакцию 19/V 1976 г.

Условные обозначения

- ВЕП_д — высота единицы переноса, полученная на лабораторной колонне, см
 ВЕП_{м, доб} — высота единицы переноса, обусловленная массопередачей; добавочная составляющая за счет продольного перемешивания, см
 a — амплитуда пульсации, ширина отверстия в насадке КРИМЗ, см
 a_K, b_K — большая и малая оси капли несферической формы, см
 D — коэффициент продольного перемешивания, см²/с
 D_T — диаметр тарелки, см
 d_K — диаметр капли, см
 $\bar{d}_K$ — средний поверхностно-объемный диаметр капли, см
 d_n — диаметр насадки (кольца Рашига), см
 d_o — диаметр отверстия в тарелке, см

$I, 0$ — значения параметра при пульсации и ее отсутствии

1. Карпачева С. М., Захаров Е. И. В сб.: Разработка и применение пульсационной аппаратуры. М., Атомиздат, 1973, с. 131.
2. Захаров Е. И., Карпачева С. М. «Цветные металлы», 1973, № 2, с. 53.
3. Колмогоров А. Н. «Докл. АН СССР», 1941, т. 32, № 1, с. 19.
4. Fischer A. «Chem. Rundschau», 1973, Bd 26, N 19, S. 1.
5. Thornton J., Smith L., Pratt H. «Trans. Inst. Chem. Engng», 1957, v. 35, N 4, p. 292.
6. Левиц В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М., Физматгиз, 1959, с. 453.
7. Каган С. З., Ковалев Ю. Н. В сб.: Процессы жидкостной экстракции и хемсорбции. Л., «Химия», 1966, с. 43.
8. Widmer W. «Chem.-Ingr-Techn.», 1967, Bd 39, N 15, S. 900.
9. Карпачева С. М., Захаров Е. И., Киселева Л. Ф. «Журн. прикл. химии», 1964, т. 37, с. 2668.
10. Misek T. «Collect. Czechosl. Commun.», 1964, v. 29, N 8, p. 1755.
11. Mauchi T., Oya H. «AIChE Journ.», 1965, v. 11, N 3, p. 395.
12. Карпачева С. М. и др. Пульсирующие экстракторы. М., Атомиздат, 1964, с. 129; 144.
13. Головкин С. М., Задорский В. Н., Васин Н. В. «Изв. вузов. Сер. Химия и химическая технология», 1972, т. 15, № 11, с. 1737.
14. Железняк А. С., Броунштейн Б. И. [7], с. 175.
15. Перовский А. П., Косых В. Г. В сб.: Процессы химической технологии. М. — Л., «Наука», 1965, с. 213.
16. Васильев А. Д., Галеев А. Ф., Турьянов А. И. В сб.: Жидкостная экстракция. Л., «Химия», 1969, с. 181.
17. Розен А. М. «Научные доклады высшей школы. Сер. Энергетика», 1958, № 3, с. 173.
18. Розен А. М. и др. В сб.: Экстракция. Вып. 2. М., Госатомиздат, 1962, с. 320.