

Определение размера капли в распылительном экстракторе Гасанов А. А.¹, Мамедов Э. А.²

¹Гасанов Алекбер Агасаф оглы / Hasanov Alakbar Agasaf oglu – заведующий кафедрой, доктор технических наук, доцент;

²Мамедов Эльбрус Алигусейн оглы / Mamedov Elbrus Aliquseyn oglu - кандидат химических наук, доцент, кафедра нефтехимической технологии и промышленной экологии, химико-технологический факультет, Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика

Аннотация: проведен анализ многочисленных формул для определения размера капли в жидкостной экстракции, необходимой для расчета межфазной удельной поверхности, и предложено уравнение, которое полностью описывает эксперимент.

Ключевые слова: жидкость, поток, фаза, экстракция, капля, диаметр.

УДК 66.01.77

Классификация аппаратуры для проведения процессов жидкостной экстракции широко описана в литературе. [1-7]. Простейшей конструкцией аппарата для проведения процесса экстракции является распылительная колонна. Распылительная колонна представляет собой трубу, в которой противотоком движутся сплошная и диспергированная фазы. Ввод диспергированной фазы в колонну осуществляется методом распыления диспергированной фазы с помощью распылительного устройства. В зависимости от объемной подачи диспергируемого компонента наблюдается пять различных режимов работы распылительной колонны [1, 8-12]. Первый - редкие капли со спутниками меньших размеров. Второй - исчезновение спутников и образование цепочки монодисперсных капель. Третий - образование струи длиной 1-2 см с дальнейшим распадом на однородные капли. Четвертый - распад струи. Пятый - единая струя, которая распадается на мелкие струйки.

По мере уменьшения размеров капель снижается скорость их движения. При достижении относительной скорости, равной скорости свободного падения по Стоксу, наступает захлебывание колонны [1].

Дисперсные системы в большей степени характеризуются полидисперсностью размеров частиц, колеблющихся в широких пределах от 1 мкм до 200 мкм, хотя в потоке могут встретиться частицы коллоидных размеров и более крупные частицы. Однако, состояние дисперсного потока, его агрегативная устойчивость к изменению размеров и седиментационная устойчивость к осаждению, в целом определяющие структуру спектра дисперсий, характеризуются размерами частиц. Следует отметить, что процессы, протекающие в дисперсных системах, сопровождаются не только столкновением и укрупнением сталкивающихся капель, но и обратным явлением – дроблением, вызванным тем, что сильно взаимодействовавшие частицы разлетаются на осколки либо не могут сохранять устойчивое состояние и распадаются самопроизвольно или под действием каких-либо возмущений на их внешней поверхности. Таким образом, в дисперсных системах существует некоторый размер a_{\max} , выше которого капли неустойчивы, деформируются и мгновенно разрушаются и минимальный размер a_{\min} , определяющий нижний порог устойчивости капель, т.е. при определенных условиях течения капли, достигшие этих размеров, не могут дальше дробиться. Максимальный размер частиц характеризует неустойчивое состояние капель и пузырей, зависящих от гидродинамических условий течения дисперсной среды, при определенных условиях турбулентного течения проявляет склонность к распаду и дроблению единичной капли. Минимальный размер частиц в потоке характеризует состояние капли или пузыря гидродинамически устойчивое к дроблению при определенных условиях течения потока и при большой концентрации частиц склонность к их интенсивному столкновению и коалесценции.

По мере увеличения скорости подачи экстрагента частота образования капель возрастает, и капли движутся по колонне в естественных условиях; объемная доля дисперсной фазы в аппарате увеличивается. С возрастанием скорости легкой фазы гидравлическое сопротивление для вывода ее из колонны будет увеличиваться, соответственно уровень раздела фаз должен понижаться. Таким образом, размеры капли играют основную роль при расчете экстракции в целом.

Для расчета экстракторов необходимо знать скорость осаждения капель. При капельном истечении дисперсной фазы в сплошную фазу от значения размера капель зависит весь расчет процесса экстракции.

При интенсивном перемешивании можно полагать, что капли постоянно коалесцируют и редуцируются, результатом чего является образование некоторого распределения капель по размерам [13-15]. Средний размер отражает состояние динамического равновесия между явлениями распада капель и их коалесценции. При этом распад капель доминирует в разбавленных эмульсиях, а их коалесценция - в концентрированных. Кроме того, известно, что скорость жидкости в сосуде изменяется

от точки к точке, и, следовательно, можно ожидать изменения размера капель в объеме экстрактора. Такие изменения размера капель действительно наблюдались. Существование коалесценции и редиспергирования также было экспериментально доказано [16-18].

В качестве среднего размера капель принимают диаметр сферы, у которой отношение поверхности к объему равно этому отношению для всей дисперсной фазы в смесителе.

Существует много способов определения размера капель [19-25].

Ниже приводятся методы определения диаметра капли.

I способ. В данном способе размер капли определяется с помощью нижеуказанной формулой

$$\vartheta + \frac{3,8295 \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta^{0,667} \cdot \rho_3 \cdot d_0}{\Delta\rho} = \frac{9,467 \cdot 10^{-5} \delta d_0}{\Delta\rho} + 0,1272 \left(\frac{d_0^{0,747} \cdot U_{d_0}^{0,365} \cdot \mu^{0,186}}{\Delta\rho} \right)^{0,667}$$

где ϑ - объем капли, m^3 ;

ρ_3 - плотность изопропилового эфира (экстрагента), $\rho_3=724,6 \text{ кг/м}^3$;

σ - коэффициент поверхностного натяжения экстрагента; $\sigma=16,49 \text{ н/м}$;

$\Delta\rho$ - разность плотностей сплошной и диспергированной фаз, $\Delta\rho=275,4 \text{ кг/м}^3$

U_k - скорость прохождения капли через отверстие, $U_k=0,1 \text{ м/сек}$;

d_k - диаметр капли;

μ - коэффициент динамической вязкости воды, $\mu=1 \text{ сПз}$.

Учитывая вышеуказанные значения параметров получаем

$$\vartheta + 10,0729 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta^{\frac{2}{3}} - 1,5914 \cdot 10^{-8} = 0$$

Обозначив $\vartheta = a^3$, $\vartheta^{\frac{2}{3}} = a$ получим следующее кубическое уравнение

$$a^3 + 10,0729 a^2 - 1,5914 \cdot 10^{-8} = 0;$$

$$\vartheta = \frac{\pi d^3}{6} = a^3 = 28,95 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$$

$$d^3 = 55,67 \cdot 10^{-9}, d = 3,82 \cdot 10^{-3}$$

II способ. Диаметр капли определяется с помощью нижеуказанного графика (рис. 1).

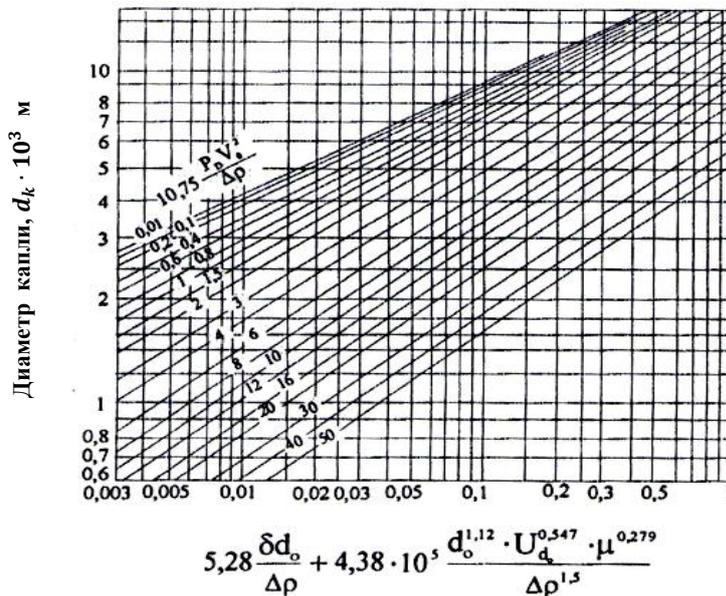


Рис. 1. Зависимость диаметра капли от свойств жидкой фазы и диаметра отверстий

Подставив значения параметров, получаем, что

$$0,79 \cdot 10^{-6} + 4,36 \cdot 10^5 \cdot \frac{0,001225 \cdot 0,2828 \cdot 0,2122}{4562} = 0,01$$

$$10,75 \cdot \frac{\rho_3 \cdot U_0^2}{\Delta\rho} = 10,75 \cdot \frac{724,4 \cdot 0,1^2}{275,5} = 0,28$$

На графике проводим линии, исходя из значений 0,01 и 0,28, и находим точки пересечений этих линий, которые соответствуют значениям

$$d_0 = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

III способ. Находят приблизительный диаметр капли по формуле

$$d_k = \sqrt{\frac{2\sigma}{g\Delta\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 16,49 \cdot 10^{-3}}{9,81 \cdot 275,6}} = 3,46 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Далее определяется безразмерный параметр R

$$R = \frac{d_0}{2d_{np}}$$

Затем с помощью графика (рис. 2) принимается значение функции f(R), где f(R)=0,685

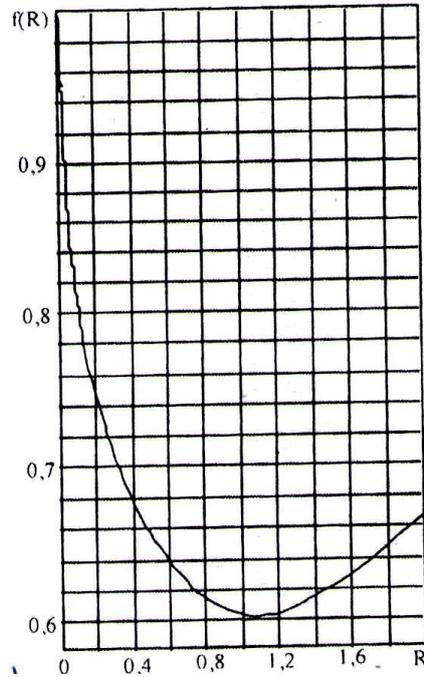


Рис. 2. Функция f(R) к уравнению (1)

По уравнению

$$V = \pi R f(R) \quad (1)$$

определяем объем капли

$$V = 3,14 \cdot 0,361 \cdot 0,685 = 0,776$$

Затем по формуле $d_0 = \gamma (6V/\pi)^{\frac{1}{3}}$ вычисляем диаметр капли

$$d_0 = 3,46 \left(\frac{6 \cdot 0,776}{3,14} \right)^{\frac{1}{3}} = 3,94 \text{ мм}$$

IV способ. Для расчета диаметра капли может быть использована формула.

$$U_0^{0,55} \left[\frac{d_0^{1,13} \mu_c^{0,29}}{\Delta\rho^{1,5}} \right] \left[\frac{2,84 \cdot 10^{14}}{g^{1,5}} \left(\frac{d_0 n}{d_{кол}} \right)^{0,96} - 23,5 \left(\frac{d_{кол}}{d_0 n} \right)^{0,56} \right] + U_0^{2,36} \left[\frac{17,3 d_0^{0,75} \mu_c^{0,19}}{\Delta\rho^{1,5}} \left(\frac{d_{кол}}{d_0 n} \right)^{1,36} \right] = 1,4 \cdot 10^{-4} \left[\frac{d_0 \sigma_m}{\Delta\rho} \right] \quad (2)$$

n - количество отверстий; $d_{кол}$ - диаметр колонны; $\Delta\rho$ - разность плотностей; g - ускорение свободного падения; ρ_d - плотность диспергированной фазы; σ_m - межфазное натяжение.

Размер капель можно определить отношением динамического давления жидкости, стремящегося разрушить каплю, к противостоящим ему силам межфазового натяжения. Если размер капли велик по сравнению с внутренним масштабом турбулентности и это отношение выражается следующим образом [26]:

$$\frac{\rho \bar{V}^2}{\sigma/d} = We_{кр} \quad (3)$$

Выражение (3) определяет критическое значение критерия Вебера для капли. Величина $We_{кр}$. Зависит от уровня турбулентности и отношения вязкости фаз. Величина \bar{V}^2 представляет собой среднее значение квадрата изменения скорости в турбулентном потоке на расстоянии, соответствующем размеру капли.

Можно показать, что в условиях изотропной однородной турбулентности \bar{V}^2 определяется по уравнению [27]:

$$\bar{V}^2 = C_1 \left(\frac{Pd}{\vartheta \rho_M} \right) \quad (4)$$

где $P/\vartheta \rho_M$ - энергия, вводимая на единицу массы жидкости.

Из уравнений (3) и (4) следует

$$d = \left(\frac{We_{кр}}{C_1} \right)^{0,6} \left(\frac{\sigma}{\rho_c} \right)^{0,6} \left(\frac{\vartheta \rho_M}{P} \right)^{0,4} \quad (5)$$

Для экстракторов, работающих при высоких значениях критерия Рэйнольдса, критерий мощности $P_0 = P/\rho_M N^3 d_M^5$ является величиной постоянной. Вводя в уравнение (5) критерий Вебера ($We_{кр} = \rho_c N^2 d_M^3 / \sigma$) для этих аппаратов и объединяя все постоянные величины в новую константу C_2 , получим:

$$d = \frac{C_2 \vartheta^{0,4}}{We_M^{0,6} d_M^{0,2}} \quad (6)$$

Мелкие капли имеют тенденцию коалесцировать. Рассматривая отношение кинетической энергии капель к энергии адгезии и, рассуждая аналогичным образом, получили следующее выражение для минимального размера капель:

$$d = \frac{C_3 d_M^{3/8}}{We_M^{3/8} \sigma^{3/8}} \quad (7)$$

где C_3 включает в числе других величин, выражение для энергии адгезии.

Выводы

Описан принцип работы распылительного экстрактора для разделения сточных вод. В зависимости от объемной подачи диспергируемого компонента предложены режимы работы распылительной колонны. Предложены уравнения для определения размера капли и рассчитаны диаметры капли по всем предложенным формулам.

Литература

1. *Calderbank P. H., Moo-Young M. B.* The continuous and mass transfer properties of dispersions. // Chem. Eng. Sci., 1961. V. 16. P. 37.
2. *Scott D. S., Hayduk W.* Gas absorption in horizontal co current bubble flow. // Can. J. Chem. Eng. 1966. v. 44. p. 130-142.
3. *Jepsen J. C.* Mass transfer in two-phase glow in horizontal pipelines. // AIChE Journal, 1970. v. 16. p. 705-716.
4. *Левич В. Г.* Физико-химическая гидродинамика. М: Издательство Физико-математической литературы, 1969.
5. *Davies C. N.* Deposition from moving aerosols. // Aerosol Science. London, 1966.
6. *Snyder W. H., Lumley J. I.* Some measurement of particle velocity auto correlation function in turbulent flow. // J. of Fluid Mechanics, 1971. v. 48. N1. p. 41-47.
7. *Walter J. F., Blanch H. W.* Bubble break-up in gas- liquid bioreactors: break-up in turbulent flows. // Chem. Eng. J., 1986. v. 32. p. 7-16.
8. *Hinze J. O.* Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes. // AIChE J., 1955. v. 1. p. 289-298.
9. *Qian D., McLaughlin J. B., Sankaranayanan K., Sundaresan S., Kontomaris K.* Simulation of Bubble Breakup Dynamics in Homogeneous Turbulence. // Chem. Eng. Comm., 2006. v. 193. p. 1038-1052.
10. *Nina Vankova, Slavka Tcholakova, Nikolai D. Denkov, Ivan B. Ivanov, Vassil D. Vulchev, Thomas Danner.* Emulsification in turbulent flow. Part 1: Mean and maximum drop diameters in inertial and viscous regimes. // Journal of Colloid and Interface Science, 2007. v. 312. № 2. p. 363-375.
11. *Sleicher C. A.* Maximum stable drop size in turbulent flow. // AIChE Journal, 2004. v. 8. № 4. p. 471-486.
12. *Higbie R.* Trans. Am. Inst. Chem. Eng., 31. 365, 1935.
13. *Memmedov A., Kelbaliyev G. I., Alisoy G.* Solution of an inverse problem for mass transfer in a drying process in a magnetic field. // Inverse Problems in Science and Engineering, 2010. v. 18. № 5. p. 723-732.
14. *Maniero R., Masbernat O., Climent E., Risso F.* Modeling and simulation of drop break-up downstream of an orifice. // Chem. Eng. Sci., 2010. v. 7. p. 1-12.
15. *Tobin T., Muralidhar R., Wright H., Ramkrishna D.* // Determination of coalescence frequencies in liquid-liquid dispersion: effect of drop size dependence // Chem. Eng. Sci., 2010. v. 7. p. 1-12.
16. *Kelbaliev G. I., Suleimanov G. Z., Phariborz A. Zorofi, Gasanov A. A., Rustamova A. I.* Extraction Separation and Cleaning of Sewage Waters by Organic Solvents with Recirculation / Russian journal of applied chemistry. Moskva, 2011. vol. 83. № 6. p. 1114-1119.

17. Келбалиев Г. И., Сулейманов Г. З., Фариборз А. Зороуфи, Гасанов А. А., Рустамова А. И. Экстракционное разделение и очистка сточных вод органическими растворителями с рециркуляцией / Химическая промышленность. Москва, 2011. 88. № 1. с. 35-41.
18. Келбалиев Г. И., Сулейманов Г. З., Фариборз А. Зороуфи, Гасанов А. А. Моделирование процессов жидкофазной экстракционной очистки сточных вод / Журнал «В Мире научных открытий», Научно-инновационный центр. Красноярск, 2011. Выпуск. 2. с. 168-170.
19. Гасанов А. А. Экстракционная очистка промышленных сточных вод и моделирование процесса расслоения несмешивающихся жидких фаз / Естественные и технические науки. Москва, 2012. № 4. (60). с. 89-92.
20. Гасанов А. А. Математическое описание процесса жидкофазной экстракции сточных вод / Международный симпозиум «Фундаментальные и прикладные проблемы в науке». Москва, 2013. Материалы симпозиума. т. 4. с. 52-60.
21. Gasanov A. A. Mathematical modeling of extraction process in spray extraction column / European applied sciences, № 4, 2014. p. 96-100.
22. Гасанов А. А. Математическое моделирование процесса очистки сточных вод от органических растворителей в распылительной экстракционной колонне // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. Москва, 2014. № 3. с. 47-52.
23. Gasanov A. A. The-mass-transfer at the wastewater countercurrent extraction processes inside of the spray tower and its modeling. Science and applied engineering quarterly. London, 2014. № 3. p. 31-43.
24. Гасанов А. А., Сулейманов Г. З., Алиев А. М. Математическое моделирование процесса жидкофазной экстракционной очистки многокомпонентных систем в распылительной экстракционной колонне / Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. Москва, 2014. № 8. с. 47-56.
25. Трейбал Р. Жидкостная экстракция. Химия, 1699. 724 с.
26. Келбалиев Г. И., Сулейманов Г. З., Фариборз А. Зороуфи, Гасанов А. А., Рустамова А. И. Экстракционное разделение и очистка сточных вод органическими растворителями. Химическая промышленность - 88. № 1, с. 35-41, 2011.
27. Гасанов А. А., Сулейманов Г. З., Алиев А. М. Математическое моделирование процесса жидкостной экстракционной очистки многокомпонентных систем в распылительной экстракционной колонне. Журнал Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе, № 8. с. 47-52, 2014.
28. Gasanov A. A. The mathematical description of liquid phase extraction of the industrial waste waters in cascaded mixing machines. Journal of Scientific Research and Development. 2 (9). 50-55, 2015.