

УДК 66.067.52 : 637.232.152

ГИДРОМЕХАНИКА

Дж. С. Торосян

Исследование предела сепарирования

(Представлено академиком АН Армянской ССР А. Г. Назаровым | 13/XII 1980)

Исследование процесса сепарирования жидких смесей показывает, что при определенных конструктивно-механических параметрах ротора сепаратора не всегда удается выделить все частицы дисперсной фазы (1-3). Это явление связано с броуновским движением и называется пределом сепарирования.

Для исследования предела сепарирования воспользуемся уравнением диффузии (4, 5):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (\vec{v}, \text{grad}c) = D\Delta c, \quad (1)$$

где c — концентрация дисперсной фазы жидкой смеси; t — время; v — скорость; D — коэффициент диффузии; Δ — оператор Лапласа.

При разделении жидких смесей в центробежных сепараторах после достижения определенного предела процесс сепарирования прекращается вне зависимости от продолжительности центрифугирования (3). Поэтому для этого режима разделения $\frac{\partial c}{\partial t} = 0$.

Введем цилиндрические координаты, направив ось oz по оси вращения ротора сепаратора. Тогда (1) будет иметь вид

$$v_r \frac{\partial c}{\partial r} + v_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 c}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

где r , θ и z — цилиндрические координаты, а v_r , v_θ и v_z компоненты скорости по координатным осям.

Исследование показывает, что граничные условия не зависят от координат z и θ , и поэтому из (2) имеем

$$D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right) = v_r \frac{\partial c}{\partial r}. \quad (3)$$

Здесь v_r — скорость осаждения частицы на радиусе r , определяемая из уравнения Стокса применительно к полю центробежных сил инерции (1,2):

$$v = \frac{1}{18} \frac{\rho_\phi - \rho_c}{\mu} d^2 \omega^2 r, \quad (4)$$

где ρ_ϕ и ρ_c — плотности дисперсной фазы и дисперсионной среды;

μ —динамическая вязкость дисперсионной среды; d —диаметр отделяемой частицы; ω —угловая скорость вращения ротора сепаратора.

Коэффициент диффузии D выразим через уравнение Эйнштейна (6). При предположении, что отделяемая частица имеет сферическую форму,

$$D = \frac{kT}{3\pi\mu d}, \quad (5)$$

где k —постоянная Больцмана; T —абсолютная температура.

Уравнение (3) на основании (4) и (5) запишем в виде

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dc}{dr} \right) = \frac{\pi d^3 (\rho_\phi - \rho_c) \omega^2 r}{6kT} \frac{dc}{dr}. \quad (6)$$

Если разделить переменные (6) и проинтегрировать их, принимая постоянную интегрирования равной нулю, то

$$\frac{dc}{c} = \frac{\pi d^3 (\rho_\phi - \rho_c) \omega^2 r}{6kT} dr. \quad (7)$$

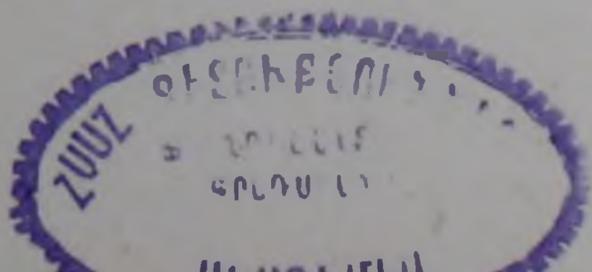
Проинтегрировав левую часть (7) от c_0 до c_ϕ , а правую от r_{\max} до r_{\min} , для сепараторов, предназначенных для разделения суспензии ($\rho_\phi > \rho_c$), найдем

$$\ln \frac{c_\phi}{c_0} = - \frac{\pi d^3 (\rho_\phi - \rho_c) \omega^2}{12kT} \cdot (r_{\max}^2 - r_{\min}^2), \quad (8)$$

где c_0 и c_ϕ —содержания дисперсной фазы жидкой смеси до и после сепарирования, а r_{\max} и r_{\min} —наибольший и наименьший радиусы тарелки. Интегрированием левой части (8) от c_0 до c_ϕ , а правой от r_{\min} (радиус входа жидкости в межтарелочное пространство) до r_{\max} найдем для сепараторов, предназначенных для разделения эмульсий ($\rho_c > \rho_\phi$), выражение, аналогичное (8). Введя обозначение $\Delta\rho$ (абсолютное значение разности плотностей разделяемых фаз), из (8) будем иметь

$$c_\phi = c_0 \exp \left(- \frac{\pi d^3 \Delta\rho}{12kT} (r_{\max}^2 - r_{\min}^2) \cdot \omega^2 \right). \quad (9)$$

Анализ уравнения (9) показывает, что при процессе центрифугирования не всегда могут быть выделены все высокодисперсные частицы дисперсной фазы жидкой смеси, так как они подвержены броуновскому движению и диффузия, вызываемая этим движением, препятствует выделению частиц из общего потока обрабатываемой жидкости, текущей по межтарелочным пространствам ротора сепаратора. Из (9) также следует, что для преодоления эффекта порога предела сепарирования необходимо увеличить напряженность поля центробежных сил инерции. Кроме того для уменьшения содержания дисперсной фазы жидкой смеси необходимо уменьшить температуру процесса. Существенным методом интенсификации процесса является увеличение диаметра отделяемых частиц, а также увеличение эффективной плотности разделяемых фаз и уменьшение вязкости дисперсионной среды.



Найдем уравнение производительности жидкостного центробежного тарельчатого сепаратора с учетом броуновского движения частиц дисперсной фазы разделяемой жидкой смеси. Исходя из того, что за время прохождения разделяемой жидкости через межтарелочное пространство сепаратора частица определенного размера должна суметь под действием поля центробежных сил инерции пройти расстояние между тарелками по направлению нормали к оси вращения, рассмотрим соотношение

$$dl = v dt, \quad (10)$$

где l —расстояние между коническими тарелками перпендикулярно оси вращения ротора сепаратора; v —скорость отделяемой частицы; t —время процесса.

Скорость отделяемых частиц на радиусе r обычно определяют с учетом свободного осаждения частицы в процессе сепарирования по гидродинамическим закономерностям, без учета молекулярной структуры жидкости (1, 2). Однако по мере того как размеры частиц становятся меньше среднего пути свободного пробега молекул дисперсионной среды (6), их движение не подчиняется закону вязкого осаждения и отличается от расчетного в связи с миграциями отдельных частиц, в результате чего резко изменяется и скорость отделяемых частиц в поле центробежных сил инерции. Предполагая, что сила сопротивления движению частиц пропорциональна скорости, и используя соотношения Эйнштейна (6), определим скорость отделяемых сферических частиц

$$v = \frac{\pi D}{6kT} d^3 (\rho_{\phi} - \rho_c) \omega^2 r. \quad (11)$$

Выделим объем разделяющей зоны ротора сепаратора в форме элементарного усеченного конуса и, используя уравнение неразрывности, найдем продолжительность процесса сепарирования (7)

$$dt = \frac{2\pi b n r dr}{Q \sin \alpha}, \quad (12)$$

где b —расстояние между коническими тарелками по направлению оси вращения ротора сепаратора; n —количество межтарелочных пространств; α —угол наклона образующей тарелки к вертикали; Q —объемная производительность сепаратора в единицу времени.

На основании (11) и (12) уравнение (10) после интегрирования левой части в пределах от 0 до l , а правой — от r_{\min} до r_{\max} запишем в виде

$$l = \frac{\pi^2}{9 \sin \alpha} b n \omega^2 d^3 \frac{D(\rho_{\phi} - \rho_c)}{kTQ} (r_{\max}^3 - r_{\min}^3).$$

Имея в виду, что $l = b \operatorname{tg} \alpha$ и $\operatorname{tg} \alpha = \frac{r_{\max} - r_{\min}}{H}$, где H —высота тарелки, найдем производительность жидкостного тарельчатого сепаратора:

$$Q = \left[\frac{\pi^2}{9 \sin \alpha} n \omega^2 H \frac{r_{\max}^3 - r_{\min}^3}{r_{\max} - r_{\min}} \right] \left[\frac{d^3 (\rho_{\phi} - \rho_c)}{kT} D \right]. \quad (13)$$

В (13) входят как величины, относящиеся к конструкции центробежного тарельчатого сепаратора и характеризующие способность сепаратора производить процесс разделения жидкой смеси, так и параметры, определяющие физико-механические свойства обрабатываемой гетерогенной жидкости.

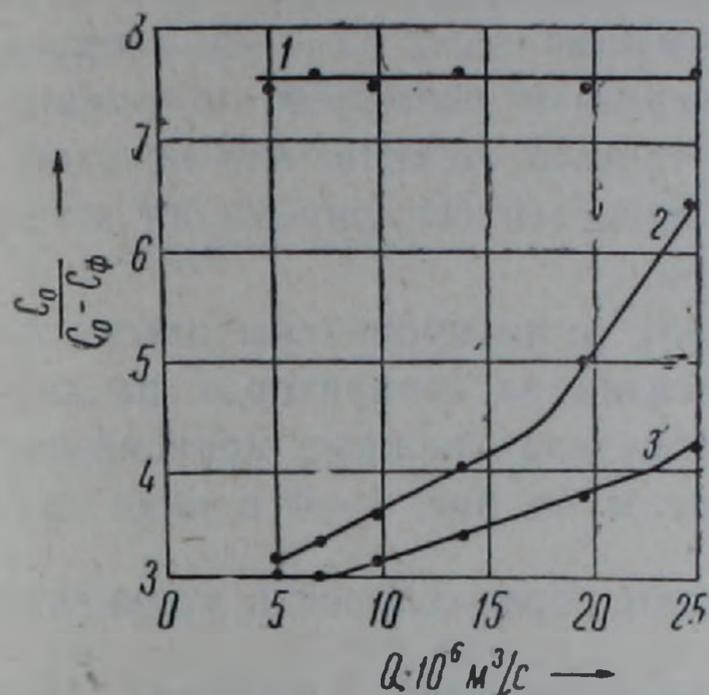


Рис. 1. Зависимость $\frac{c_0}{c_0 - c_{\phi}} = f(Q)$, полученная на сепараторе модели АС—2Е при разделении эмульсии жижики с $c_0 = 7\%$ и при 305°K : 1— $\omega = 870$; 2— 980 ; 3— 1150 рад/с

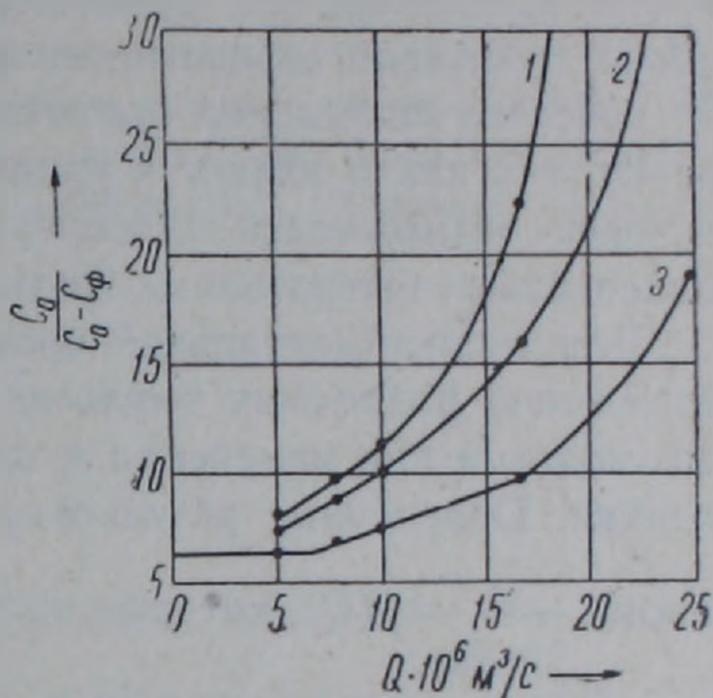


Рис. 2. Зависимость $\frac{c_0}{c_0 - c_{\phi}} = f(Q)$, полученная на сепараторе модели АС—2Е при разделении эмульсии жижики с $c_0 = 6,6\%$ и $\omega = 1150$ рад/с при: 1— $T = 343$; 2— $T = 323$; 3— $T = 303^\circ\text{K}$

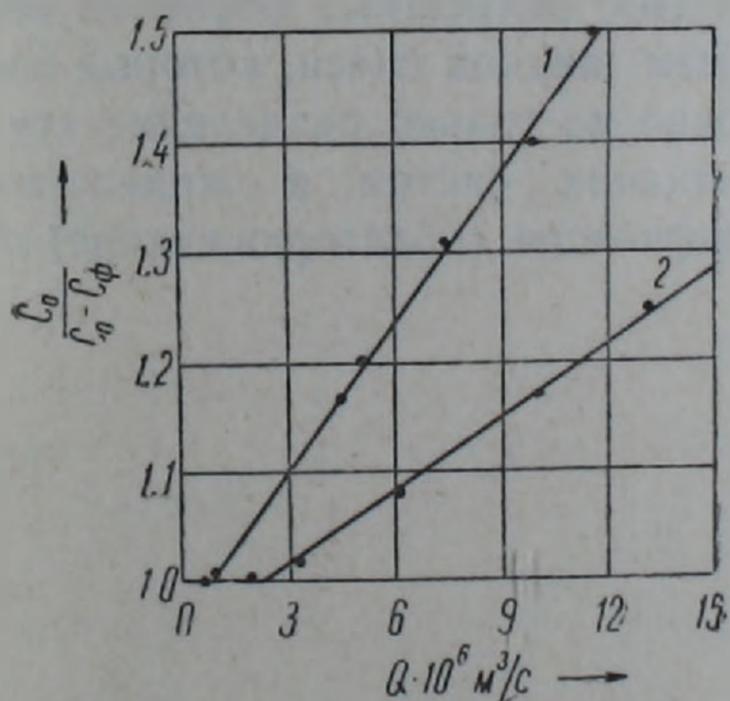


Рис. 3. Зависимость $\frac{c_0}{c_0 - c_{\phi}} = f(Q)$, полученная на сепараторе модели ОТ—ОР—230 при разделении суспензии азопигмента бордо „ЧЖ“ с $c_0 = 0,4\%$ и $\omega = 950$ рад/с с дисперсионной средой: 1—без диспергатора; 2—с диспергатором

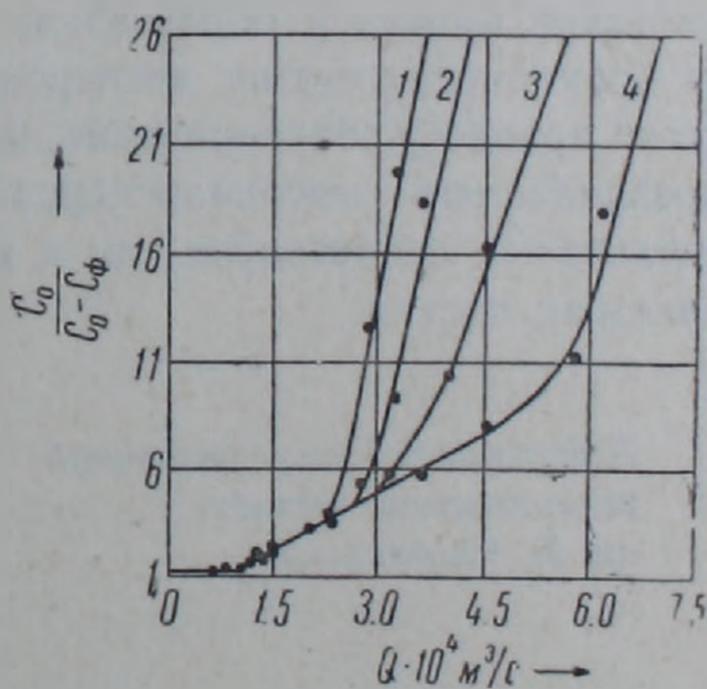


Рис. 4. Зависимость $\frac{c_0}{c_0 - c_{\phi}} = f(Q)$, полученная на сепараторе модели ОТ—3М600—НЖ при разделении суспензии азопигмента ярко-красного „ЧЖ“ при содержании дисперсионной фазы в исходной суспензии: 1— $c_0 = 5,16$; 2— $c_0 = 2,5$; 3— $c_0 = 1,1$; 4— $c_0 = 1,03\%$

Из (13) вытекает, что если в разделяемой жидкой смеси имеются частицы дисперсной фазы жидкой смеси определенных размеров, способные совершать броуновское движение, они не всегда могут быть выделены при процессе сепарирования, так как ввиду наличия градиента концентрации в межтарелочном пространстве в отделяемой жидкости происходит диффузия. Уравнение (13) показывает, что эффективность процесса сепарирования повышается с увеличением напряженности поля центробежных сил инерции и с уменьшением температуры процесса, что принципиально отличается от выводов по общепринятым формулам производительности сепаратора. Кроме того из (13) следует, что качество разделения существенно зависит от размеров отделяемых частиц, так как d входит в уравнение в третьей степени. Это открывает новые возможности интенсификации процесса сепарирования высокодисперсных гетерогенных жидких систем.

Для экспериментальной проверки (13) были проведены опыты по разделению различных эмульсий и суспензий на сепараторах различных моделей при изменении в широких пределах режима центрифугирования. Полученные результаты приведены на рис. 1—4 в виде графиков $\frac{c_0}{c_0 - c_{\phi}} = f(Q)$, которые подтверждают справедливость уравнений (9) и (13) и указывают новые пути идентификации процесса. При нарушении линейной связи $\frac{c_0}{c_0 - c_{\phi}} = f(Q)$ качество классификации резко нарушается (дисперсные составы разделенной и исходной суспензий существенно не отличаются). Процесс сепарирования и классификация частиц дисперсной фазы гетерогенных систем осуществляются с помощью поверхностно-активных веществ. В этом случае благодаря процессу образования развитых сольватных оболочек вокруг броуновских частиц дисперсной фазы жидкой смеси, которые подлежат процессу сепарирования, возможно не только разделение трудноразделяемых высокодисперсных жидких систем в жидкостных тарельчатых сепараторах, но и классификация (облагораживание) отделяемых частиц.

Ленинканский государственный
педагогический институт
им. М. Налбандяна

Ջ. Ս. ԹՈՐՈՍՅԱՆ

Սեպարացիայի սահմանի հետազոտումը

Ուսումնասիրված է ափսեավոր կենտրոնախույս հեղուկային բաժանիչների անջատման սահմանը: Առաջարկված է բաժանիչի արտադրողականության հավասարումը այն դեպքի համար, երբ բաժանվող տարակազմ հեղու-

կի դիսպերսիոն ֆազի մասնիկների շարժումը շեղվում է մաթուցիկ նստվածքի հիդրոդինամիկ օրինաչափություններից: Առաջարկված է անջատման պրոցեսի ինտենսիֆիկացման և անջատման սահմանի շեմքի հաղթահարման ուղիները: Հետազոտություններից ստացված արդյունքներն ամրապնդված են փորձերով:

ЛИТЕРАТУРА — ԿՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ Г. И. Бремер, Жидкостные сепараторы, Машгиз, М., 1957. ² В. И. Соколов, Центрифугирование, Химия, М., 1976. ³ Д. С. Торосян, ДАН АрмССР, т. 75, № 1 (1982). ⁴ В. Г. Левич, Физико-химическая гидродинамика, Физматгиз, М., 1959. ⁵ В. В. Кафаров, Основы массопередачи, Высшая школа, М., 1962. ⁶ А. Эйнштейн, Собр. науч. тр., т. 3, Наука, М., 1966. ⁷ Д. С. Торосян, Изв. АН АрмССР. Техн. науки, т. 36, № 1 (1983).