

УДК 66.067.52:637.232.152

ГИДРОМЕХАНИКА

Дж. С. Торосян

Критический режим тонкослойного центрифугирования

(Представлено академиком АН Армянской ССР Г. С. Саякяном 6/II 1985)

При определенных параметрах режима тонкослойного центрифугирования жидких гетерогенных систем в межтарелочных пространствах сепаратора возникает неустойчивое состояние, при котором резко нарушается ход процесса (1,2). В качестве примера на рис. 1 и 2 приведены результаты разделения натурального молока и подсырной сыво-

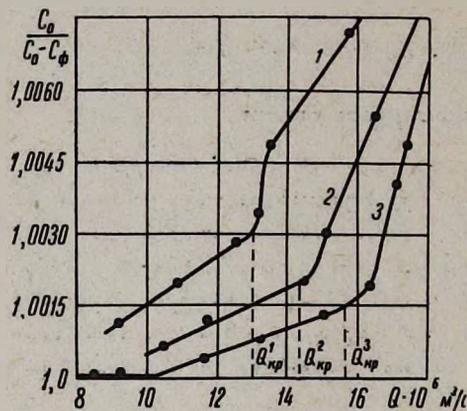


Рис. 1. Зависимость $c_0 / (c_0 - c_{\Phi}) = f(Q)$ (c_0 и c_{Φ} — содержание жира до и после сепарирования, Q — производительность аппарата), полученная при разделении натурального молока на фракции при $c_0 = 4,2\%$, температуре процесса 293°K и угловой скорости вращения ротора, рад/с: 1—1005; 2—1120; 3—1204

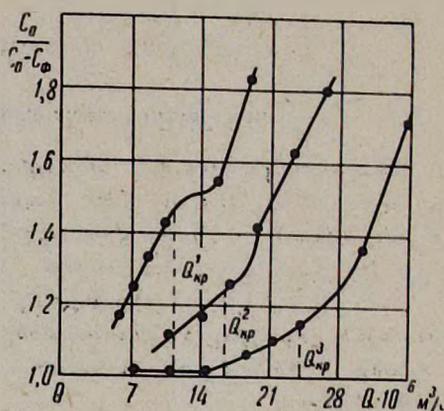


Рис. 2. Зависимость $c_0 / (c_0 - c_{\Phi}) = f(Q)$, полученная при разделении подсырной сыворотки на фракции при $c_0 = 0,2\%$, температуре процесса 293°K и угловой скорости вращения ротора, рад/с: 1—628; 2—837; 3—1256

ротки на сепараторе «Сатурн». Ниже расчет критического режима процесса тонкослойного сепарирования производится на основании учета волнового движения жидкости в межтарелочном пространстве центробежного тарельчатого сепаратора. Учет волнового движения жидкости в роторе центробежного тарельчатого сепаратора не только даст возможность вести исследования по-новому, но и объясняет многие факты, до сих пор не имеющие какого-либо обоснования.

Рассмотрим поверхностные волны в межтарелочном пространстве центробежного тарельчатого сепаратора, считая при этом, что амплитуда волны — малая величина по сравнению с ее длиной (3-8). Записываем уравнение нестационарного движения жидкости в виде (5-8)

$$\vec{\partial v} / \partial t = -\nabla p / \rho + \vec{F}_u + \vec{F}_k + \nu \Delta \vec{v}, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0, \quad (2)$$

где \vec{v} — скорость жидкости; t — время; \vec{F}_u и \vec{F}_k — центробежная и кориолисова силы инерции, отнесенные к единичной массе; ρ — плотность жидкости; p — давление; ν — кинематическая вязкость жидкости; Δ и ∇ — операторы Лапласа и Гамильтона.

Тогда уравнение (1) в направлении r представим в виде

$$\partial v_r / \partial t = -\partial p / (\rho \partial r) + \omega^2 r \sin^2 \alpha + 2\omega v_\theta \sin \alpha + \nu \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right), \quad (3)$$

где ω — угловая скорость вращения ротора сепаратора; α — угол наклона образующей тарелки к вертикали; v_r и v_θ — компоненты скорости жидкости в направлении r и θ ; r — расстояние от вершины конуса до рассматриваемой точки; θ — угловая координата.

Уравнение неразрывности (2) представим в виде

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \alpha} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r}{r} = 0. \quad (4)$$

Значение величины компонентов скорости жидкости v_r и v_θ определим с помощью функции тока Ψ и потенциала скорости φ (при этом $\Delta \varphi = 0$) (5-8).

На основании (3) и (4) имеем

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_r^0}{\partial t} + \frac{1}{r \sin \alpha} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t \partial \theta} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \omega^2 r \sin^2 \alpha + 2\omega v_\theta \sin \alpha + \\ & + \nu \left(\frac{\partial^2 v_r^0}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r^0}{\partial r} - \frac{v_r^0}{r^2} \right) + \nu \frac{\partial}{\partial \theta} \frac{1}{r \sin \alpha} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} - \frac{\Psi}{r^2} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Из уравнения (5) вытекает равенство

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \nu \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} - \frac{\Psi}{r^2} \right). \quad (6)$$

Уравнение возмущенной поверхности жидкости в произвольный момент времени t определяется координатами r и θ , т. е. $r = \xi(r, \theta, t)$. Заменим значение r в уравнении (6) на величину ξ , представляющую собой радиус возмущенной поверхности жидкости в межтарелочном пространстве центробежного тарельчатого сепаратора, и решение уравнения (6) представим в виде

$$\Psi = \Psi_0 \exp[i(n\xi - \sigma t)], \quad (7)$$

где Ψ_0 — амплитудное значение функции Ψ ; n — волновое число; ξ — радиус возмущенной поверхности жидкости в межтарелочном пространстве сепаратора; σ — круговая частота; t — время. Из уравнения (7) имеем

$$\nu n^2 - i\sigma - in\nu/\xi + \nu/\xi^2 = 0. \quad (8)$$

В условиях тонкослойного сепарирования величинами ν/ξ и ν/ξ^2 в уравнении (8) можно пренебречь ввиду их малости. Тогда получим

значение скорости жидкости в межтарелочном пространстве центробежного сепаратора

$$u = u_0 \exp[-(\sigma/(2\nu))^{0.5z}] \exp[(\sigma/(2\nu))^{0.5z} - \sigma t]. \quad (9)$$

где u_0 —амплитуда волны.

Из уравнения (9) следует, что волна в радиальном направлении затухает по экспоненциальному закону. Следуя (5), назовем величину $\delta = (2\nu/\sigma)^{0.5}$ «глубиной проникновения волны», которая численно равна расстоянию, на котором амплитуда волны уменьшается в «e» раз. Для определенности примем, что круговая частота σ примерно равна угловой скорости вращения ротора центробежного тарельчатого сепаратора ω (3,4).

Величина «глубины проникновения» волнового движения жидкости в межтарелочном пространстве центробежного тарельчатого сепаратора, когда амплитуда волны уменьшается в «e» раз, определится по формуле

$$\delta = (2\nu/\omega)^{0.5}, \quad (10)$$

где δ —расстояние, на котором амплитуда волны уменьшается в «e» раз; ν —кинематическая вязкость жидкости; ω —угловая скорость вращения ротора сепаратора. Получим критериальную зависимость для расчета режима потери устойчивости процесса тонкослойного сепарирования на основании выражения (10). Для этого записываем значение числа Рейнольдса для слоя жидкости, где амплитуда волнового движения уменьшается в «e» раз, в виде (9)

$$Re_s = v\delta/\nu, \quad (11)$$

где v —средняя скорость движения жидкой гетерогенной системы по межтарелочному пространству при потере устойчивости процесса.

Комбинируя физические параметры текущей по межтарелочным пространствам жидкой гетерогенной системы с механическими факторами ротора центробежного тарельчатого сепаратора, из выражений (10) и (11) получим

$$Re_s = (2R_e R_0 \Gamma^{-1})^{0.5}, \quad (12)$$

где $R_e = v h/\nu$; $R_0 = v/\omega R$; $\Gamma = h/R$ —критерии Рейнольдса, Россби и геометрического подобия; h —расстояние между тарелками по нормали; R —средний радиус тарелки.

Аналогичным образом, комбинируя физические параметры разделяемой жидкой гетерогенной системы и механические факторы ротора центробежного тарельчатого сепаратора, на основании выражений (10) и (11) можно получить

$$Re_s = (2R_0^2 E^{-1} \Gamma^{-1})^{0.5}, \quad (13)$$

где $E = \omega h^2/\nu$ —критерий Экмана.

На основании выражений (12) и (13) имеем

$$R_0 = R_e E \Gamma. \quad (14)$$

Критериальное уравнение (14), определяющее критический режим

процесса тонкослойного сепарирования, получило экспериментальное подтверждение (1).

При этом, как следует из уравнения (14), при изменении угловой скорости вращения ротора центробежного тарельчатого сепаратора между критериями Рейнольдса и Экмана существует обратно пропорциональная зависимость (рис. 3), в то время как критерий Россби остается неизменным. При изменении количества межтарелочных пространств и геометрических размеров тарелок (при постоянной угловой скорости вращения ротора сепаратора) зависимость между критериями Рейнольдса и Россби прямо пропорциональная (рис. 4). В

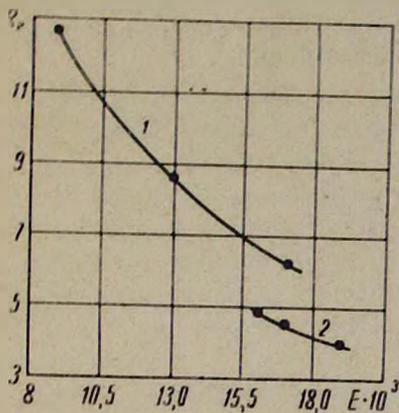


Рис. 3. Зависимость $Re=f(E)$ при разделении: 1—подсырной сыворотки; 2—натурального молока

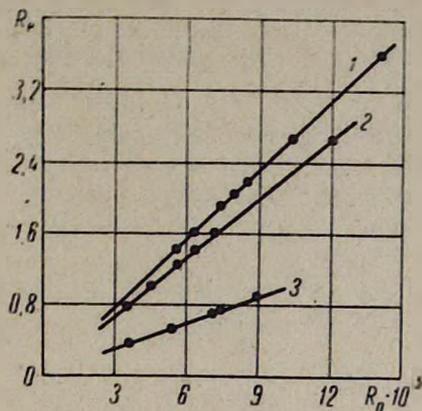


Рис. 4. Зависимость $Re=f(R_0)$, полученная на сепараторе ОТ-ОР-230 при разделении суспензии азопигмента бордо „Ж“ с $c_0=0,13\%$ (масс.) при различных количествах межтарелочных пространств при наибольшем диаметре пакета тарелок, м: 1—0,15; 2—0,12; 3—0,1

этом случае критерий Экмана сохраняет постоянное значение. С помощью критериального уравнения (14), описывающего процесс потери устойчивости процесса сепарирования жидкой гетерогенной системы в межтарелочных пространствах центробежного тарельчатого сепаратора, можно определить наибольшую производительность аппарата, при которой возникает критический режим разделения, когда качественно и резко ухудшаются результаты разделения.

Лешнаканский государственный
педагогический институт
им. М. Налбандяна

Ջ. Ս. ՔՈՐՈՍՅԱՆ

Նուրբ-շերտային կենտրոնախույզ բաժանման կրիտիկական ռեժիմը

Ուսումնասիրված է կենտրոնախույզ փսիսային զատիչ մեքենաների միջ-
փսիսային տարածութուններում մաժուցիկ հեղուկի ալիքային շարժումը:

Ստացված է շափանհիշային հավասարում, որը հնարավորություն է ստեղծում որոշել նուրբ-շերտային կենտրոնախույզ բաժանման պրոցեսի կրիտիկական սեմիմի պարամետրերը:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ Д. С. Торосян, Изв. АН АрмССР. Техн. науки. т. 35, № 4 (1982). ² Д. С. Торосян, ДАН АрмССР, т. 75, № 1 (1982). ³ Д. С. Торосян, в кн.: Проблемы динамики взаимодействия деформированных сред, Изд-во АН АрмССР, 1984. ⁴ Д. С. Торосян, ДАН АрмССР, т. 79, № 4 (1984). ⁵ Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц, Механика сплошных сред, ГИИТЛ, М., 1953. ⁶ Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розг. Теоретическая гидромеханика, ч. I, Физматгиз, М., 1963. ⁷ Л. Н. Сретенский, Теория волновых движений жидкости, Наука, М., 1977. ⁸ Дж. Лайтхилл, Волны в жидкостях, Мир, М., 1981. ⁹ В. И. Соколов, Центрифугирование, Химия, М., 1976.