



УДК 541.18 532.517.4

Вероятность дробления и устойчивости капель в ядре турбулентного потока жидкости в условиях однородной и изотропной турбулентности и в аппарате с перемешиванием

Шмидт А.А.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С-Петербург,

Ганин П.Г.

Санкт-Петербургская государственная химико-фармацевтическая академия, С-Петербург

Аннотация

В системе типа жидкость - жидкость - твёрдая фаза с механическим перемешиванием возможна адсорбция дисперсных фаз и формирование сложных частиц, в том числе «двойных частиц» типа капля - твёрдая частица. Теоретическая оценка вероятности дробления «двойных частиц» была приведена ранее, однако, для её экспериментальной проверки необходимо оценить вероятность дробления непосредственно и самих капель (образующих «двойные частицы») как в одном испытании, так и за время их пребывания в зонах аппарата.

Предложена теоретическая оценка вероятности дробления и устойчивости капель в одном испытании при их нахождении в ядре турбулентного потока жидкости в условиях однородной и изотропной турбулентности, а также в зонах реального аппарата с механическим перемешиванием.

Ключевые слова: адсорбция, дробление, вероятность, турбулентность, поток жидкости, система жидкость - жидкость.

In liquid - liquid - solid phase type system with mechanical stirring an adsorption of disperse phases and formation of complex particles, including «double particles» of drop-solid particle type, is possible. The theoretical estimation of “double particles” breakup probability was described earlier, however, for its experimental check it is necessary to estimate directly a probability of drops (forming «double particles») breakup both in one test, and during their stay in apparatus zones.

The theoretical estimation of probability of drops breakup and stability in one test at their presence in a nucleus of liquid turbulent flow in homogeneous and isotropic turbulence conditions, and also in zones of the real apparatus with mechanical stirring, is proposed.

Key words: adsorption, breaking up, probability, turbulence, stream of liquid, system liquid - liquid.

Введение

В аппарате с механическим перемешиванием, содержащем двухфазную систему типа жидкость - жидкость, под воздействием разности динамических напоров происходит деформация и дробление капель, а так же их столкновения и

коалесценция. Дробление капель может происходить как в ядре турбулентного потока жидкости, так и вблизи твёрдых поверхностей аппарата [1, 2]. Акт дробления капель имеет случайный характер, обусловленный двумя обстоятельствами: случайным характером изменения пульсационной скорости жидкости в окрестности капли и вероятностью нахождения капли в той или иной зоне (зоны характеризуются локальными величинами диссипации энергии) аппарата. Оценка вероятности дробления и устойчивости капель имеет как теоретический, так и практический интерес для моделирования ряда технологических процессов и их интенсификации.

Предметом нашего внимания является экспериментальное и теоретическое моделирование развития микроорганизмов с использованием жидких гидрофобных соединений (субстратов) - компонентов нефти в аппарате (ферментаторы, водоочистные сооружения) с интенсивным механическим перемешиванием. Для моделирования кинетики роста клеток необходима, в частности, оценка устойчивости адсорбционного взаимодействия клеток с каплями субстрата в турбулентном потоке жидкости, поскольку основной поток гидрофобного субстрата в клетки происходит через межфазную поверхность клетка-капля [3-5]. Данный объект можно представить как систему типа жидкость - жидкость - твёрдая фаза с механическим перемешиванием.

В системе типа жидкость - жидкость - твёрдая фаза с механическим перемешиванием возможна адсорбция дисперсных фаз и формирование сложных частиц, в том числе «двойных частиц» типа капля - твёрдая частица. Теоретическая оценка устойчивости [3] и вероятности дробления «двойных частиц» в ядре турбулентного потока жидкости была приведена ранее [4, 5], её экспериментальная проверка может основываться на сопоставлении размерного распределения сложных частиц во входном потоке жидкости в зону мешалки и выходном потоке из этой зоны.

Оценка дробления сложных частиц, если они представляют собой не «многослойные» агломераты, может базироваться на теоретической оценке дробления «двойных частиц». Однако изменение размерного распределения частиц в локальной зоне аппарата будет следствием как дробления сложных частиц на образующие их частицы, так и дробления непосредственно самих капель. Таким образом, возникает необходимость оценки вероятности дробления и устойчивости капель как в одном испытании, так и за время их пребывания в различных зонах аппарата. В первом приближении механизм дробления капель, составляющих «двойные частицы», аналогичен механизму дробления индивидуальных капель.

Цель работы - теоретическая оценка вероятности дробления и устойчивости капель в одном испытании при их нахождении в ядре турбулентного потока жидкости в условиях однородной и изотропной турбулентности, а также в зонах реального аппарата с механическим перемешиванием.

Теоретическая часть

Приведём оценку условий устойчивости по отношению к деформации и дроблению капель, а также оценку наибольшего диаметра капель, устойчивых в ядре турбулентного потока жидкости в условиях однородной и изотропной турбулентности, а так же в аппарате с неоднородным распределением диссипации энергии.

1. Условия однородной и изотропной турбулентности.

1.1. Условие устойчивости капли в потоке жидкости по отношению к деформации предполагает превышение капиллярного давления p_σ (препятствующего деформации) над разностью динамических напоров Δp_d (деформирующих каплю) [1, 6-7]

$$\Delta p_d \leq p_\sigma, \quad (1)$$

откуда следует

$$\rho (1/2) (\Delta v_d)^2 \leq 4\sigma_{жж} / d, \quad (2)$$

где ρ - плотность сплошной фазы; Δv_d - разность скорости жидкости в окрестности капли (т.е. масштаба $\lambda=d$); $\sigma_{жж}$ - межфазное натяжение жидкость-жидкость.

Очевидно, что величина Δv_λ представляет собой «мгновенное» (текущее) значение пульсационной скорости того же масштаба - $v'_\lambda(t)$.

1.2. Условие деформации капли в потоке жидкости, с учётом (1), будет иметь вид

$$\Delta p_d > p_\sigma, \quad (3)$$

откуда, с учётом (2), получим

$$\rho (1/2) (\Delta v_d)^2 > 4\sigma_{жж} / d. \quad (4)$$

1.3. Условие дробления капли в потоке жидкости предполагает необходимость достаточной продолжительности деформации, т. е. выполнения условия деформации (3, 4) в течение времени, превышающего характерное время дробления капли данного диаметра (d) [1]. Это условие можно представить в виде

$$\Delta t_{\text{Деф}(d)} \geq \tau_{0(d)}, \quad (5)$$

где $\Delta t_{\text{Деф}(d)}$ - время деформации капли диаметром d ; $\tau_{0(d)}$ - характерное время дробления капли диаметром d .

Отметим, что условие (5) неявным образом предполагает выполнение условия деформации (4). Однако теоретическая оценка величины $\tau_{0(d)}$ определена с точностью до порядка [1], что затрудняет использование непосредственно условия дробления (5) для расчётов. Эта сложность «преодолевается» следующим образом, предполагающим очевидное приближение.

Условие дробления капли оценивают зависимостью, полученной из условия деформации (4) при замене разности скоростей жидкости в окрестности капли (Δv_d) величиной пульсационной скорости масштаба капли (v'_d)

$$\rho (1/2) (v'_d)^2 > 4\sigma_{жж} / d, \quad (6)$$

где v'_d - пульсационная скорость масштаба капли $\lambda=d$.

Для анализа условия дробления (6) и последующих оценок необходимо принять во внимание свойства (характер) пульсационного движения жидкости в условиях локальной однородной и изотропной турбулентности:

I. Среднее значение пульсационной скорости (при однородной и изотропной турбулентности) за достаточно большой промежуток времени (t) равно нулю [1, 7]

$$\bar{v}' \approx 0, \quad \text{при } t \rightarrow \infty. \quad (7)$$

II. Пульсационное движение жидкости произвольного масштаба λ характеризуется среднеквадратичным значением пульсационной скорости, усреднённой за достаточно большой промежуток времени [1, 7] (запишем в следующей форме)

$$v'_\lambda = [\{ \bar{v}'_\lambda(t) \}^2]^{1/2}, \quad (8)$$

где $v'_\lambda(t)$ - «мгновенное» (текущее) значение пульсационной скорости масштаба λ .

Отметим, что, определения «среднеквадратичное значение» и «усреднённое за достаточно большой промежуток времени» применительно к пульсационной скорости обычно опускаются [7].

III. Амплитуда пульсационной скорости (A_λ) представляет собой случайную величину, распределённую, в первом приближении по нормальному закону [7, 8].

IV. Для максимальной величины пульсационной скорости с учётом (свойства III) принята оценка [5, 9, 10]

$$v'_{(\max)\lambda} \approx 3v'_\lambda. \quad (9)$$

Отметим, что такая оценка максимальной величины ($X_{\max} \approx 3\sigma_X$) принята для любой случайной величины (X) имеющей нормальное распределение [9, 10]. Вероятность превышения случайной величиной X её максимального значения X_{\max} составляет $P(|X - m_X| < 3\sigma_X) \approx 0,0028$, которая принимается пренебрежимо малой: $P(|X - m_X| < 3\sigma_X) \approx 0$, где m_X , σ_X - математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение случайной величины X , соответственно.

V. Для оценки можно принять, что текущая величина пульсационной скорости на протяжении одного периода пульсаций изменяется по гармоническому закону (рис. 1)

$$v'_\lambda(t) = A_\lambda \sin(2\pi t/T_\lambda), \quad (10)$$

где A_λ - амплитудная величина пульсационной скорости масштаба λ ; t - время; T_λ - характерный период пульсаций масштаба λ .

Очевидно, что в условии устойчивости (6) принятие в расчёт не амплитудной величины пульсационной скорости (A_d), а среднее квадратичное значение (v'_d) предполагает (возможность) выполнение условия (5) достаточной продолжительности деформации капли для реализации акта дробления - превышение времени деформации капли над характерным временем её дробления. Действительно, в этом случае существует определённый промежуток времени Δt (на протяжении одного периода пульсации T_d), когда мгновенная величина пульсационной скорости $v'_d(t)$ превышает собственно пульсационную скорость v'_d . Это имеет место от момента, когда $v'_d(t)$ достигает величины v'_d (в период возрастания $v'_d(t)$ до амплитудной величины A_d) до момента, когда $v'_d(t)$ вновь достигает v'_d (в период последующего снижения от амплитудного значения) (рис. 1).

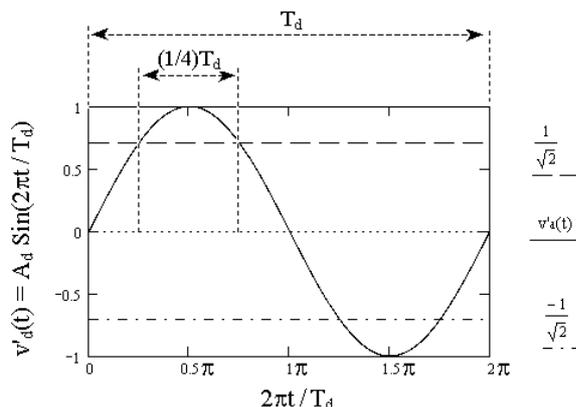


Рис. 1. Сопоставление пульсационной скорости $v'_d = 2^{-1/2} A_d$ и её мгновенной величины $v'_d(t) = A_d \sin(2\pi t/T_d)$ за время одной пульсации.

Масштаб движения жидкости $\lambda = d$.

T_d - характерный период пульсационной скорости масштаба $\lambda = d$; t - время; амплитудная величина пульсационной скорости принята равной $A_d = 1$.

Оценим временной интервал Δt соответствующий выполнению условия превышения мгновенной величины пульсационной скорости над среднее квадратичной величиной $v'_d(t) > v'_d$. Принимая, во внимание гармоничный

закон изменения мгновенной (текущей) величины пульсационной скорости (8) и учитывая, что среднеквадратичная величина $\sin(\omega t)$ составляет $[\{\overline{\sin(\omega t)}\}^2]^{1/2} = 2^{-1/2}$, будет иметь

$$v'_d(t) = A_d \sin(2\pi t/T_d) > [\{\overline{v'_d(t)}\}^2]^{1/2} = 2^{-1/2} A_d, \quad (11)$$

Можно показать, что условие деформации (11) выполняется (непрерывно) на протяжении временного интервала

$$\Delta t = T_d [\{\pi - 2 \arcsin(2^{-1/2})\} / 2\pi] = (1/4) T_d. \quad (12)$$

1.4. Диаметр наибольших капель, устойчивых в ядре турбулентного потока жидкости $d_{кр}$, оценивается при принятии в расчёт максимальной величины пульсационной скорости [7], тогда из (2), следует

$$\rho (1/2) (v'_{(max)d_{кр}})^2 \approx 4\sigma_{жж} / d_{кр}, \quad (13)$$

где $v'_{(max)d_{кр}}$ - максимальная величина пульсационной скорости масштаба капли: $\lambda = d_{кр}$.

Пульсационная скорость v'_λ оценивается на основе теории локальной однородной и изотропной турбулентности и «закона двух третей» Колмогорова - Обухова [11-12]. При $\lambda_0 < \lambda \ll 1$ (где λ_0 - внутренний масштаб турбулентности, 1 - размер области, в которой происходит движение жидкости) величина v'_λ определяется локальным значением диссипации энергии в расчёте на единицу массы жидкости ε_0^L и масштабом движения λ

$$(v'_\lambda)^2 \approx (\varepsilon_0^L \lambda)^{2/3}. \quad (14)$$

Максимальная величина пульсационной скорости с учётом (9) и (14) составит

$$v'_{(max)\lambda} = 3v'_\lambda \approx 3(\varepsilon_0^L \lambda)^{1/3}. \quad (15)$$

2. Условия неоднородной турбулентности. В объёме реального аппарата с механическим перемешиванием распределение диссипации энергии весьма неоднородно. В первом приближении в аппаратах выделяют две зоны - зону мешалки и основную зону аппарата, в пределах этих зон предполагается выполнение условий однородной и изотропной турбулентности [7]. Каждая из выделенных зон характеризуется объёмами и локальными величинами диссипации энергии (ε_0^L).

Применительно к реальному аппарату условие устойчивости капли и, соответственно, диаметр наибольших капель может оцениваться для соответствующих зон аппарата. При этом в уравнении (13) необходимо использовать локальные значения диссипации энергии для зон аппарата, тогда, соответственно, получатся оценки диаметров капель (локальные величины $d_{кр}^L$) устойчивых в зонах $d_{кр}^Z$.

Диаметр наибольших капель, устойчивых в ядре турбулентного потока жидкости в аппарате с перемешиванием $d_{кр}$ оценивается из условия (13), при принятии в расчёт максимальной величины пульсационной скорости в той зоне аппарата, где достигается наибольшая локальная величина диссипации энергии (ε_0^L). Наибольшая ε_0^L и, соответственно, наибольшая величина пульсационной скорости достигается в зоне мешалки [7] ($\varepsilon_{0\max}^L = \varepsilon_0^{ZM}$), тогда из (13) следует

$$\rho (1/2) (v'_{(max)d_{кр}^{ZM}})^2 \approx 4\sigma_{жж} / d_{кр}, \quad (16)$$

где $v'_{(max)d_{кр}^{ZM}}$ - максимальная величина пульсационной скорости масштаба капли в зоне мешалки ($\lambda = d_{кр}$ в зоне мешалки).

Таким образом, диаметр наибольших капель, устойчивых в аппарате ($d_{кр}$), соответствует диаметру наибольших капель, устойчивых в зоне мешалки ($d_{кр}^{ZM}$), т.е. - локальной величине $d_{кр}^L$ для зоны мешалки: $d_{кр} = d_{кр}^{ZM}$.

В аппарате стандартного конструктивного типа с турбинной мешалкой и разделительными перегородками локальная величина диссипации энергии (ε_0^L) в

зоне мешалки $\varepsilon_0^{ZM}=50\div 100\varepsilon_0$, где ε_0 - средняя по аппарату величина [7, 13]. В расчётах принято использовать среднюю оценку величины ε_0^{ZM} [7], равную

$$\varepsilon_0^{ZM} \approx 75\varepsilon_0. \quad (17)$$

Расчитанная из уравнения (16) и с учётом (14, 15, 17) величина $d_{кр}$ удовлетворительно согласуется с экспериментальной величиной среднего объёмно-поверхностного диаметра капель полидисперсной эмульсии ($d_{оп}$) [7]. Это обстоятельство позволяет основываться на приведённых теоретических оценках.

Отметим, что известны эмпирические уравнения, отражающие влияние вязкости жидкостей сплошной и дисперсной фаз, а также объёмного содержания жидкой дисперсной фазы на величину $d_{кр}$ [14].

3. Вероятность дробления капли в одном испытании ($p_{дроб.д}$). Условия однородной и изотропной турбулентности (локальная и средняя по аппарату величины диссипации энергии адекватны $\varepsilon_0^L \equiv \varepsilon_0$). Одним испытанием капли на дробление будем считать испытание в течение времени (Δt), равного характерному периоду пульсаций жидкости (T_λ) масштаба капли $\lambda=d$: $\Delta t=T_d$.

Воспользуемся уравнением устойчивости (2) для решения обратной задачи - вычислим наименьшую пульсационную скорость жидкости масштаба капли (произвольного диаметра $\lambda=d$), превышение которой приведёт к дроблению капли ($v'_{(кр)д}$)

$$\rho (1/2) (v'_{(кр)д})^2 \approx 4\sigma_{жж} / d, \quad (18)$$

откуда, с учётом (4) очевидно, что условием дробления капли будет

$$v^{(1)}_d > v'_{(кр)д}, \quad (19)$$

где $v^{(1)}_d$ - среднеквадратичная величина пульсационной скорости масштаба $\lambda=d$, усреднённая за промежутки времени, равный периоду пульсаций жидкости того же масштаба $\Delta t=T_d$.

Таким образом, вероятность дробления капли в одном испытании будет соответствовать вероятности выполнения условия (19), что можно выразить в виде

$$p_{дроб.д} = p(v^{(1)}_d > v'_{(кр)д}). \quad (20)$$

С учётом характера пульсационного движения жидкости (см. свойство III) можно сделать следующую оценку. Вероятность попадания случайной величины X , имеющей нормальное распределение, в заданный интервал выражается через функцию Лапласа. В частном случае

$$p(|X - m_X| < y) = \Phi_L(y / 2^{1/2}\sigma_X), \quad (21)$$

где m_X - математическое ожидание случайной величины X ; σ_X - среднеквадратичное отклонение случайной величины X ; $\Phi_L(x)$ - функция Лапласа

$$\Phi_L(x) = (2 / \pi^{1/2}) \int_0^x \exp(-t^2) dt. \quad (22)$$

С учётом (21, 22) уравнение (20) можно привести к виду

$$p_{дроб.д} = 1 - p(v^{(1)}_d < v'_{(кр)д}), \quad (23)$$

откуда, принимая во внимание (21), получим

$$p_{дроб.д} = 1 - \Phi_L(v'_{(кр)д} / 2^{1/2}\sigma_{v'}). \quad (24)$$

Пульсационная скорость жидкости, по определению этой величины, представляет собой среднеквадратичное значение пульсационной скорости, усреднённое за бесконечно большой промежуток времени (см. свойство II), следовательно, $v'_\lambda \equiv \sigma_{v'\lambda}$, а математическое ожидание $m_X=0$ (см. свойство III), с учётом этого уравнение (24) примет вид

$$p_{дроб.д} = 1 - \Phi_L(v'_{(кр)д} / 2^{1/2}v'_d). \quad (25)$$

Величину $p_{\text{дроб.}d}$, заданную уравнением (25) удобно выразить через приведённый диаметр капли. Деление уравнений (18) на (16), после элементарных преобразований, даст

$$v'_{(\text{кр})d} = v'_{(\text{max})d_{\text{кр}}}(d_{\text{кр}}/d)^{1/2},$$

откуда, с учётом (9, 14, 15), а так же $\varepsilon_0^L \equiv \varepsilon_0$, для пульсационной скорости масштаба $\lambda=d_{\text{кр}}$, получим

$$v'_{(\text{кр})d} \approx 3v'_{d_{\text{кр}}}(d_{\text{кр}}/d)^{1/2} \approx 3(\varepsilon_0 d_{\text{кр}})^{1/3}(d^*)^{-1/2}. \quad (26)$$

где $d^*=d/d_{\text{кр}}$ - приведённый диаметр капли.

Пульсационную скорость масштаба $\lambda=d$, с учётом (14), можно представить

$$v'_d \approx (\varepsilon_0 d)^{1/3}, \quad (27)$$

тогда деление уравнения (26) на уравнение (27) даст

$$v'_{(\text{кр})d} / v'_d = 3(d^*)^{-5/6}. \quad (28)$$

Уравнение (25), с учётом (28), примет вид

$$p_{\text{дроб.}d} = 1 - \Phi_L(3 / 2^{1/2} d^{*5/6}). \quad (29)$$

На рис.1.А приведена расчётная зависимость вероятности дробления капли в одном испытании ($p_{\text{дроб.}d}$) от приведённого диаметра капли ($d^*=d/d_{\text{кр}}$).

4. Вероятность устойчивости капли в одном испытании ($p_{\text{уст.}d}$). Условия однородной и изотропной турбулентности (локальная и средняя по аппарату величины диссипации энергии адекватны $\varepsilon_0^L \equiv \varepsilon_0$). Величину $p_{\text{уст.}d}$ можно оценить из очевидного уравнения

$$p_{\text{уст.}d} = 1 - p_{\text{дроб.}d}, \quad (30)$$

откуда, с учётом (29), будем иметь

$$p_{\text{уст.}d} = \Phi_L(3 / 2^{1/2} d^{*5/6}). \quad (31)$$

На рис.2.Б приведена расчётная зависимость вероятности устойчивости капли в одном испытании ($p_{\text{уст.}d}$) от приведённого диаметра капли ($d^*=d/d_{\text{кр}}$).

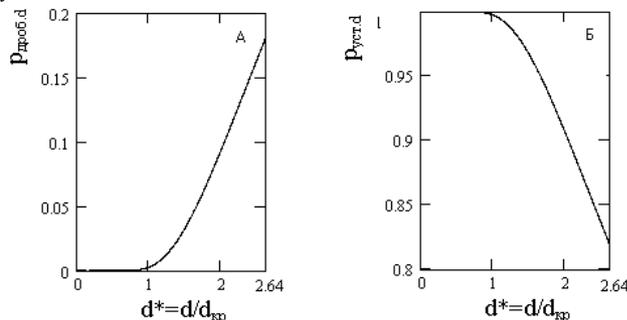


Рис. 2. Расчётные зависимости вероятности (А) дробления ($p_{\text{дроб.}d}$) и (Б) устойчивости ($p_{\text{уст.}d}$) капли в одном испытании от приведённого диаметра капли ($d^*=d/d_{\text{кр}}$). d - диаметр капли; $d_{\text{кр}}$ - диаметр наибольших капель, устойчивых в ядре турбулентного потока жидкости.

Обсуждение результатов

Приведённые количественные оценки вероятности дробления и устойчивости капель в одном испытании при их нахождении в ядре турбулентного потока жидкости в условиях однородной и изотропной турбулентности можно использовать для аналогичных оценок применительно к реальным аппаратам с механическим перемешиванием, где распределение энергии весьма неоднородно. Для этого величину диссипации энергии (ε_0), входящую в уравнения, необходимо заменить соответствующими локальными значениями (ε_0^L) для зон аппарата (ε_0^Z). Отметим,

что локальными значениями ε_0^L часто удобно выразить через среднюю для аппарата величину диссипации энергии ε_0 .

Можно показать, что для аппаратов стандартного конструктивного типа с турбинной мешалкой и разделительными перегородками (при загрузке 0,5), локальная величина диссипации энергии (ε_0^L) в основной зоне аппарата $\varepsilon_0^{ZF} \approx 0,25\varepsilon_0$ [5]. Из этого, в частности следует, что размер наибольших капель, устойчивых в ядре турбулентного потока жидкости в основной зоне аппарата ($d_{крZF}$), приблизительно в 10 раз превышает аналогичную величину для зоны мешалки: $d_{крZF} \approx 10d_{крZM}$ [5].

Для аппаратов стандартного конструктивного типа с турбинной мешалкой и разделительными перегородками установлена эмпирическая функция распределения капель полидисперсной эмульсии (распределение объёма дисперсной фазы) по размеру капель [5, 15]. Отмечается, что расчётная величина диаметра наибольших капель, устойчивых в аппарате с перемешиванием ($d_{кр}$) удовлетворительно согласуется с эмпирической величиной среднего объёмно-поверхностного диаметра капель ($d_{оп}$): $d_{кр} \approx d_{оп}$. Диаметр наибольших капель полидисперсной эмульсии составляет $d_{max} = 2,64d_{оп}$, что соответствует приведённому диаметру наибольших капель полидисперсной эмульсии $d_{max}^* = d_{max}/d_{кр} = 2,64$. Этим обстоятельством обусловлен выбранный интервал значения d^* на рис. 2.

Оценим вероятности дробления и устойчивости капель в одном испытании при нахождении капель в зонах реального аппарата. Полученная аналитическая зависимость вероятности дробления и устойчивости капель от их приведённого диаметра (к локальной величине $d_{кр}$) облегчает количественные оценки и способствует наглядной иллюстрации.

В зоне мешалки, как следует из расчётных данных (29), приведённых на рис. 2.А, вероятность дробления наибольших капель полидисперсной эмульсии ($d = d_{max}$, т.е. $d^* = 2,64$) в одном испытании составляет 0,18, а капель диаметром $d = d_{кр}$ (т.е. $d^* = 1$) - 0,0028.

В основной зоне аппарата приведённый диаметр наибольших капель полидисперсной эмульсии в основной зоне аппарата составит $d^*_{ZF} = d/d_{кр,ZF} \approx 0,1$. Как следует из расчётных данных, приведённых на рис. 2.А, вероятность дробления наибольших капель полидисперсной эмульсии ($d^*_{max,ZF} = d_{max}/d_{кр,Z} = 0,26$) в одном испытании в основной зоне аппарата пренебрежимо мала.

Оценка вероятности дробления и устойчивости капель может служить основой для оценки времени жизни индивидуальных капель в турбулентном потоке жидкости (параметр необходим для описания кинетики адсорбции веществ на поверхности жидкой дисперсной фазы), а также для теоретической оценки распределения капель по размерам в аппарате с механическим перемешиванием. Для последней оценки - необходимо теоретически оценить вероятности дробления капель (произвольного диаметра d) за время их пребывания в зонах аппарата $P_{дроб.d.Z}$. Величина $P_{дроб.d.Z}$ может быть подвергнута экспериментальной проверке.

Заключение

Дробление и устойчивость капель в одном испытании при их нахождении в ядре турбулентного потока жидкости в условиях однородной и изотропной турбулентности представляет собой случайный процесс, обусловленный случайным характером изменения амплитудной величины пульсационной скорости.

Вероятности дробления и устойчивости капель в одном испытании при их нахождении в ядре турбулентного потока жидкости в условиях однородной и изотропной турбулентности зависят от размера капель и могут быть выражены через приведённый диаметр капель.

В реальном аппарате, с неоднородным распределением диссипации энергии, вероятности дробления и устойчивости капель в одном испытании при их нахождении в ядре турбулентного потока жидкости в различных зонах аппарата, могут быть выражены через приведённые диаметры капель для соответствующих зон (локальные величины).

Список литературы

1. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. 699 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 3-е изд., перераб. М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. – 736 с.
3. Ганин П.Г. Теоретическая оценка устойчивости адсорбционного взаимодействия частиц твёрдой и жидкой дисперсных фаз в аппарате с перемешиванием // Сорбционные и хроматографические процессы. 2006. Т. 6. Вып. 3. С. 486-497.
4. Ганин П.Г. Адсорбционное взаимодействие частиц твёрдой и жидкой дисперсных фаз в аппарате с перемешиванием. Теоретическая оценка вероятности дробления и устойчивости взаимодействия частиц в одном испытании // Сорбционные и хроматографические процессы. 2007. Т. 7. Вып. 3. С. 444-455.
5. Ганин П. Г. Адсорбционное взаимодействие частиц твёрдой и жидкой дисперсных фаз в аппарате с перемешиванием. Теоретическая оценка вероятности дробления и устойчивости взаимодействия частиц за время их пребывания в зонах аппарата // Сорбционные и хроматографические процессы. 2007. Т. 7. Вып. 4. С. 618-630.
6. Колмогоров А. Н. О дроблении капель в турбулентном потоке // Докл. АН СССР. 1949. Т. 66. Вып 5. С. 825-828.
7. Брагинский Л. Н., Барабаш В. М., Бегачёв В. И. Перемешивание в жидких средах. Физические основы и методы расчёта. Л.: Химия, 1984. 336 с.
8. Бреншоу П. Введение в турбулентность и её измерение. М.: Мир, 1974. 277 с.
9. Химельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. М.: Мир, 1973. 957 с.
10. Гурский Е.И. Теория вероятностей с элементами математической статистики. М.: Высшая школа, 1971. 328 с.
11. Колмогоров А. Н. Рассеяние энергии при локальной изотропной турбулентности // Докл. АН СССР. 1941. Т. 32. Вып 1. С. 19-21.
12. Обухов А.М. О распределении энергии в спектре турбулентного потока // Докл. АН СССР. 1941. Т. 32. Вып 1. С. 22-24.
13. Mockel H.O. Die Verteilung der ortlichen Energiedissipation in einem Ruhrwerk // Chem. Techn. 1980. V. 32. № 3. P. 127-129.
14. Кафаров В.В., Винаров А.Ю., Гордеев Л.С. Моделирование биохимических реакторов. М.: Лесная пром-сть, 1979. 344 с.
15. Sprow S. B. B. Distribution of Drop Size Produced in Turbulent Liquid – Liquid Dispersion // Chem. Eng. Sci. 1967. V. 22. P. 435-439.

Шмидт Александр Александрович - д.ф.-м.н., ст. науч. сотр., и.о. зав. сектором численного моделирования, физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, тел. 8(812) 292-71-45

Ганин Павел Георгиевич - к.т.н., ст. науч. сотр. кафедры микробиологии Санкт-Петербургской государственной химико-фармацевтической академии минздравсоцразвития РФ, тел. 8(812) 328-33-02

Shmidt Alekandr A. - Dr. of Science (Phis.-Math.), act. Head of Numerical Modelling Department, Senior reasercher Ioffe Physical-Technical Institute of the Academy of Sciences Russia, St. Petersburg, e-mail: alekandr.schmidt@mail.ioffe.ru

Ganin Pavel Georgievich - k.t.n., senior reasercher, Microbiology Department, St. Petersburg State Chemical-Pharmaceutical Academy Russia, St. Petersburg,, e-mail: ganin-pavel@rambler.ru