

**РАСЧЕТ ДИАМЕТРА ЧАСТИЦ ЭМУЛЬСИИ,
ПОЛУЧЕННОЙ В РОТОРНОМ ИМПУЛЬСНОМ АППАРАТЕ**

М. А. Промтов[✉], **В. Г. Желудков**, **Н. Ц. Гатапова**, **А. Ю. Степанов**

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная
безопасность», promtov.ma@mail.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: размер частиц; роторный импульсный аппарат; удельная потребляемая мощность; циклы обработки; частота вращения; эмульсия.

Аннотация: Рассмотрена методика расчета максимального диаметра частиц эмульсии на основе модели Хинце, описывающей процесс диспергирования капель эмульсии в турбулентном потоке с применением теории локально-изотропной турбулентности Колмогорова. Максимальный размер устойчивых капель в эмульсии с низкой концентрацией дисперсной фазы зависит от ее физических параметров и потребляемой мощности, отнесенной к единице массы эмульсии. Проведены экспериментальные исследования по диспергированию подсолнечного масла в дистиллированной воде при обработке в роторном импульсном аппарате (РИА) с целью получения 10%-ной эмульсии. Получены экспериментальные зависимости среднего диаметра частиц эмульсии от частоты вращения ротора и количества циклов обработки эмульсии в РИА. Установлено, что для РИА с частотой вращения ротора 50...80 об/с эмпирический коэффициент соотношения среднего диаметра частиц исследованной эмульсии и расчетного максимального диаметра устойчивой частицы эмульсии равен $0,2 \pm 0,1$.

Введение

Эмульсии представляют собой коллоидные дисперсии, которые состоят как минимум из двух несмешивающихся жидкостей, причем одна из них диспергирована в другой в виде мелких капель. Эмульсионные системы используются в различных отраслях промышленности, таких как химическая (краски, пропитки, присадки, получение полимеров, пестицидов, взрывчатых веществ, массообменные процессы и др.), пищевая (молоко, сливки, соусы, заправки, майонез, маргарин и т.п.), фармацевтическая (мази, бальзамы, микстуры, инкапсулированные лекарства, биологически-активные добавки и т.п.), косметическая (молочко, мази, лосьоны, крема и др.) [1, 2].

Одним из наиболее информативных показателей качества эмульсий служат размеры частиц: средний арифметический, средний объемно-поверхностный, максимальный и другие статистические виды размеров, а также распределение частиц по размерам, которое влияет на другие характеристики, включая реологические свойства, внешний вид, стабильность и т.д. Как правило, эмульсии подраз-

деляются на три класса: макроэмульсии (размер капель 0,1...5 мкм), миниэмульсии (20...100 нм) и наноэмульсии (5...50 нм) [1, 2].

Для приготовления эмульсий применяются различные технологии и оборудование, начиная от циркуляционного метода при течении жидкостей по трубопроводам, статическим смесителям. Широко применяются роторные устройства различной конструкции (роторно-пульсационные и роторные импульсные аппараты, коллоидные мельницы), емкости с мешалками, а также гомогенизаторы высокого давления, ультразвуковые генераторы и мембранные методы эмульгирования [1, 3]. Образование эмульсии без специальных поверхностно-активных веществ не может происходить самопроизвольно, и для образования и дробления капель требуется энергия. При выборе технологии и оборудования для получения эмульсии определенного вида с прогнозируемыми параметрами стоит задача расчета размеров частиц. Образование относительно крупных капель (несколько мкм), как в случае с макроэмульсиями, требует относительно небольших удельных затрат энергии, и поэтому для получения макроэмульсии достаточно высокоскоростных мешалок или роторных устройств. Образование мелких капель (субмикронных, как в случае с наноэмульсиями) затруднено, и для этого требуется большое количество поверхностно-активного вещества и(или) энергии [1, 3].

Теоретическая часть

В промышленности для получения тонкодисперсных эмульсий, как правило, применяется оборудование с интенсивным гидродинамическим воздействием, создающим турбулентный режим течения макро- и микропотоков в обрабатываемом объеме жидкости [3]. Для расчета размеров частиц эмульсии, получаемой при турбулентном режиме течения, часто применяют подходы, предложенные в работах [4 – 6].

На основе теории локально-изотропной турбулентности А. Н. Колмогорова [4, 7] модель диспергирования капель эмульсии в турбулентном потоке была разработана Д. О. Хинце [5]. Основной постулат теории Колмогорова – это перенос турбулентной кинетической энергии без ее диссипации от крупных формирований (вихрей) к более мелким в системе с однородной изотропной турбулентностью. Диспергирование капли в турбулентной зоне происходит при преобладании мгновенных напряжений на поверхности капли над силами поверхностного натяжения и вязкости капли.

Напряжение, возникающее при деформации капли размером d , определяется как [6]

$$\tau_c = \rho \overline{V_d^2} = \rho \int_{1/d}^{\infty} E(k) dk, \quad (1)$$

где ρ – плотность сплошной фазы, кг/м³; $\overline{V_d^2}$ – среднеквадратичная разность скоростей на поверхности капли диаметром d , м²/с²; $E(k)$ – функция спектральной плотности энергии, k – волновое число или обратная длина вихря, м⁻¹. Здесь учитывается только энергия, содержащаяся в вихрях с масштабом меньше $k = 1/d$. Более крупные вихри не деформируют каплю, а перемещают ее в объеме сплошной среды.

Развитое турбулентное течение жидкости характеризуется наложением на осредненный направленный поток случайных пульсаций скорости с переменными направлением и амплитудой [3]. В однородной и изотропной турбулентной среде значение пульсаций скорости за достаточно большие промежутки времени равно нулю [4]. В связи с этим пульсационное движение масштаба $\lambda_0 \ll \lambda \ll \lambda_{\max}$ характеризуется среднеквадратичным значением пульсационной скорости

$$\bar{V} = \sqrt{V_\lambda^2}, \quad (2)$$

где λ – расстояние, на котором мгновенное значение скорости изменяется на величину V_λ , м; λ_0 , λ_{\max} – соответственно критический и максимальный масштабы пульсаций.

В масштабах $\lambda_0 < \lambda$ пульсационная скорость определяется законом «двух третей» Колмогорова–Обухова [7, 8]

$$\bar{V}_\lambda^2 \approx (\varepsilon \lambda)^{2/3}, \quad (3)$$

где ε – локальное значение энергии потока, Вт/кг.

Пульсационная скорость может рассматриваться как разность мгновенных значений скорости в точках, отстоящих одна от другой на расстоянии λ . Пульсации с масштабом, соотнесенным с размером капли d , будут создавать в противоположных точках поверхности капли разность динамических напоров

$$\Delta P_d = \rho V_d^2 / 2, \quad (4)$$

где V_d – скорость на поверхности капли, м/с.

Для скоростей рассеивания энергии, которые обычно наблюдаются в аппаратах с турбулентным режимом эмульгирования, конечные размеры капель малы по сравнению с макромасштабом турбулентности, но велики по сравнению с микромасштабным вихрем [4]

$$\lambda_0 = (\eta^3 / \varepsilon)^{1/4}, \quad (5)$$

где η – кинематическая вязкость сплошной фазы, м²/с.

Вихри, которые взаимодействуют с каплями, попадают в инерционный поддиапазон турбулентности, $d \approx \lambda$. Эти вихри локально изотропны, и $E(k)$ может быть описано с помощью теории локально-изотропной турбулентности Колмогорова с учетом предположения, что $\lambda_0 \ll d \ll \lambda_{\max}$ [7, 9]

$$E(k) = C_k \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}, \quad (6)$$

где $C_k \sim 1,5$ – константа Колмогорова. Подставляя (6) в выражение (1), получим

$$\tau_c \approx \rho \varepsilon^{2/3} d^{2/3}. \quad (7)$$

Необходимо отметить, что ε – фактически локальная скорость рассеивания энергии, которая широко варьируется для оборудования с турбулентным режимом эмульгирования.

Силы сцепления, обусловленные межфазным натяжением и вязкостью, препятствуют деформации капли. Поверхностная сила на единицу площади определяется как

$$\tau_s \approx \sigma / d, \quad (8)$$

где σ – поверхностное натяжение, Дж/м².

Согласно О. Д. Хинце [5], вязкое напряжение внутри капли равно

$$\tau_d \approx \mu_d \frac{(\tau_c / \rho_d)^{1/2}}{d}. \quad (9)$$

Это закон вязкости Ньютона, в соответствии с которым характерная скорость внутри капли $(\tau_c / \rho_d)^{1/2}$ связана с турбулентным напряжением на ее поверхности [6], здесь ρ_d – плотность капли, кг/м³.

Анализ уравнений (7) – (9) показывает, что существует максимальный стабильный размер капли d_{\max} , при превышении которого разрушающие силы достаточны для диспергирования капли, а при снижении капля стабилизируется за счет поверхностных и внутренних вязких сил [6]. При $d = d_{\max}$ динамические силы на поверхности капли уравнивают силы сцепления

$$\tau_c = \tau_s + \tau_d . \quad (10)$$

Для капель, устойчивых в турбулентном потоке, справедливо равенство

$$\rho \frac{V^2}{2} = 4\sigma/d . \quad (11)$$

Если дисперсная фаза в эмульсии имеет низкую вязкость, то величина τ_d незначительна, и только поверхностная сила способствует устойчивости капли. Согласно уравнению (10), приравняем (7) и (8). После преобразований получаем [6]

$$d_{\max} = C_1(\sigma/\rho)^{3/5} \varepsilon_{\max}^{-2/5} , \quad (12)$$

где константа C_1 определяется эмпирическим путем.

Максимальный стабильный размер капель не будет достигнут до тех пор, пока все капли дисперсной фазы не окажутся в области потока с наибольшей энергией. Следовательно, d_{\max} определяется максимальной скоростью рассеивания энергии [6]. Исходя из этого положения в уравнении (12) используется параметр ε_{\max} . Кроме того, для достижения равновесия потребуется большое количество проходов через активную турбулентную зону или последовательное многократное прохождение капель эмульсии через несколько зон обработки потока эмульсии в турбулентном режиме.

Для геометрически аналогичных турбулентных систем ε_{\max} рассматривается как среднее значение, и этот параметр может быть определен потребляемой мощностью, отнесенной к единице массы эмульсии. Для эмульсионных систем с низкой концентрацией дисперсной фазы равновесный диаметр капель эмульсии будет определяться размером d_{\max} и меньше.

Экспериментальная часть

Для определения влияния удельных затрат мощности на размер капель эмульсии с низкой концентрацией дисперсной фазы и малой вязкостью проведены экспериментальные исследования по эмульгированию подсолнечного масла в дистиллированной воде при обработке в роторном импульсном аппарате РИА-150. Конструктивная схема РИА-150 показана на рис. 1, геометрические параметры приведены ниже [10]:

Радиус ротора R_p , мм.....	75
Ширина прямоугольного канала ротора, статора a , мм	3
Высота прямоугольного канала ротора, статора, мм.....	16
Длина канала, мм	
ротора l_p	12
статора l_c	16
Число каналов в роторе, статоре	18
Зазор между ротором и статором δ , мм	0,1
Радиус рабочей камеры R_k , мм	130

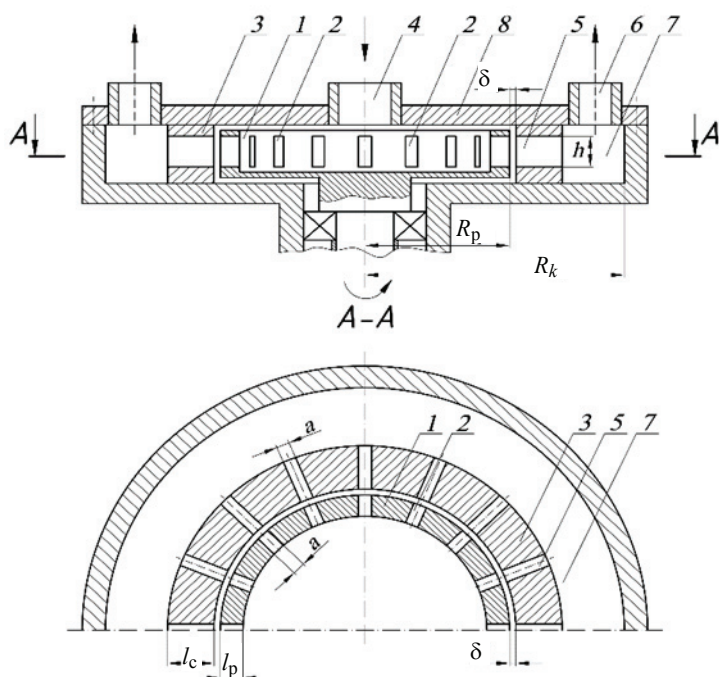


Рис. 1. Конструктивная схема роторного импульсного аппарата:

1 – ротор; 2 – каналы ротора; 3 – статор; 4 – входной патрубок; 5 – каналы статора; 6 – выходной патрубок; 7 – рабочая камера; 8 – крышка

Технологическая схема установки на базе РИА-150 представлена на рис. 2. Установка включает в себя РИА, насос, емкость для эмульсии, приборы для измерения расхода, давления и температуры. Скорости вращения валов насоса, РИА регулировались частотными преобразователями. Обработка осуществлялась перекачиванием эмульсии из емкости насосом под давлением в РИА и обратно в емкость.

Соотношения воды и масла в эмульсии принималось как 9 : 1. Использовалась дистиллированная вода по ГОСТ Р 58144–2018 «Вода дистиллированная. Технические условия» и подсолнечное рафинированное масло, соответствующее ГОСТ 1129–2013 «Масло подсолнечное. Технические условия». Масса обрабатываемой эмульсии в установке составляла 10 кг.

Дистиллированная вода заливалась в емкость установки и с помощью частотного преобразователя создавалась небольшая подача насоса (≈ 1 л/мин), в емкость добавлялось подсолнечное масло и проводилось циркуляционное перемешивание для получения грубодисперсной эмульсии в течение 2 циклов оборота эмульсии через гидравлическую систему при отсутствии вращения ротора РИА и совмещенных каналов ротора и статора. Затем производили отбор пробы грубодисперсной исходной эмульсии.

Для обработки эмульсии в установке с помощью частотных преобразователей электродвигатели насоса и РИА разгоняли до заданной частоты вращения. Обработка эмульсии проходила в циклическом режиме за счет циркуляции эмульсии по замкнутому гидравлическому контуру из емкости в насос, затем под давлением в РИА и обратно в емкость. Число циклов обработки определялось по счетчику жидкости. За время обработки фиксировался объем жидкости, прошедший через РИА, температура эмульсии и давление на входе в аппарат. Эмульсию обрабатывали при средней подаче в РИА равной $(6,5 \pm 0,4)$ л/мин и давлении на входе в РИА $(0,26 \pm 0,02)$ МПа.

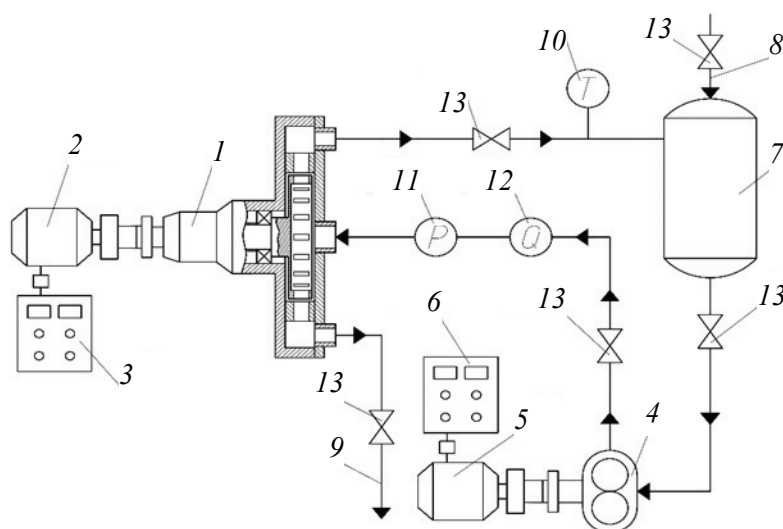


Рис. 2. Технологическая схема установки РИА-150:

1 – РИА; 2 – электродвигатель РИА; 3, 6 – частотные преобразователи; 4 – шестеренный насос; 5 – электродвигатель насоса; 7 – емкость; 8 – патрубок залива жидкости; 9 – патрубок отбора проб и слива; 10 – термометр; 11 – манометр; 12 – счетчик жидкости; 13 – шаровой кран

При заданной угловой скорости вращения ротора РИА пробы эмульсии отбирали после 4, 8, 12, 16 и 20 проходов через РИА. Во избежание изменения размеров частиц эмульсии из-за коалесценции, пробы эмульсии анализировались не позже 1 часа после их отбора.

На рисунке 3 показаны гистограммы, полученные с прибора NICOMP-380ZLS для исходной грубодисперсной эмульсии и эмульсии после 20-кратного прохода через аппарат РИА-150 при частоте вращения ротора $n = 70$ об/с.

Результаты экспериментальных исследований по определению зависимости среднего диаметра частиц эмульсии от количества циклов обработки при частоте вращения ротора $n = 50$ об/с представлены на рис. 4.

Для представления результатов анализа на приборе NICOMP-380ZLS в соответствии с рекомендациями стандарта ISO 22412-2008 необходимо применять два значения: среднее значение диаметра (*англ.* Mean Diameter) и дисперсию (*P.I.*) для

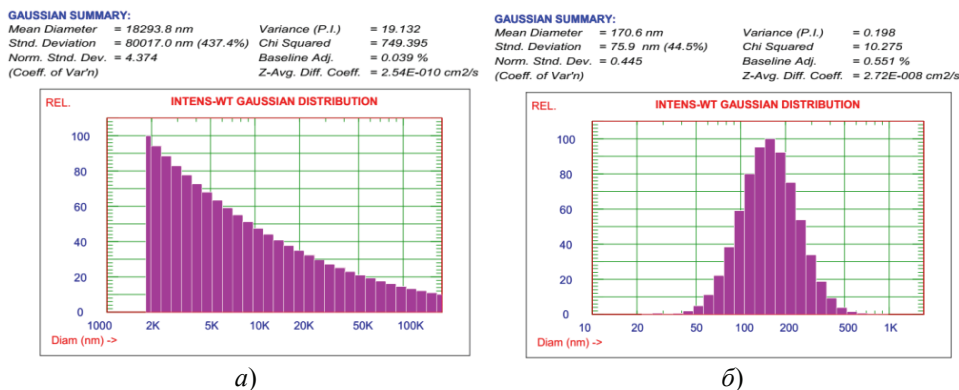


Рис. 3. Гистограммы распределения частиц эмульсии подсолнечного масла в воде до (а) и после обработки (б) в РИА

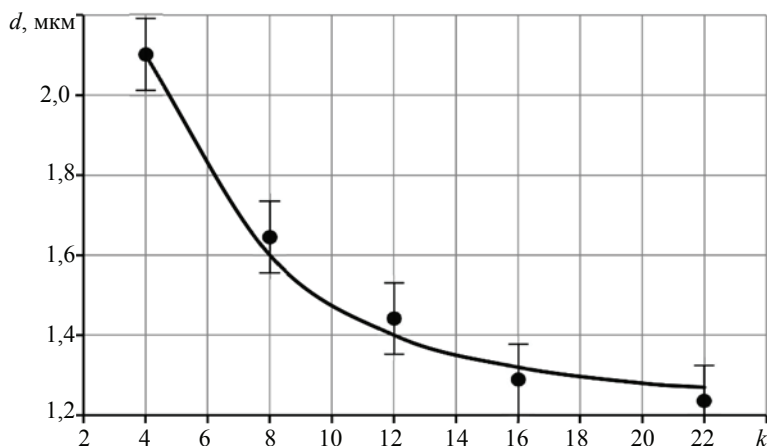


Рис. 4. Графики зависимости размера частиц эмульсии d от числа циклов обработки k в РИА

взвешенного по интенсивности Гауссова распределения (*англ.* Intensity Weighted Gaussian Distribution). Для практики в качестве характеристики распределения по размерам удобно использовать средний диаметр частиц и стандартное отклонение (*англ.* Standard Deviation), которые имеют одинаковые единицы измерения.

Средний диаметр частиц эмульсии подсолнечного масла в воде достигает предельно минимального значения при обработке в РИА-150 ориентировочно через 20 циклов при частоте вращения ротора 40 об/с и подаче насоса 6 л/мин (см. рис. 4). Дальнейшая обработка эмульсии не приводит к заметному уменьшению размера частиц эмульсии.

Обсуждение результатов и выводы

Удельная мощность, диссипируемая в обрабатываемой эмульсии, определяется потребляемой мощностью РИА N_1 , затрачиваемой на вращение ротора, и потребляемой мощностью насоса N_2 , затрачиваемой на подачу эмульсии в РИА за время обработки,

$$\varepsilon_1 = \frac{N}{m} = \frac{N_1 + N_2}{m}, \quad (13)$$

где ε_1 – удельная мощность, Вт/кг; N – общая потребляемая мощность, Вт; m – масса эмульсии в установке, кг; N_1 и N_2 – мощность, потребляемая соответственно РИА и насосом, Вт.

В качестве потребляемой мощности РИА и насоса примем мощности их электродвигателей. Мощности электродвигателей РИА и насоса рассчитываются по формуле

$$N_{1,2} = 1,73 I_{1,2} U \cos \varphi_{1,2} \frac{K_{1,2}}{100}, \quad (14)$$

где $I_{1,2}$ – сила фазного тока в электродвигателях РИА и насоса, А; $U = 380$ В – напряжение сети; $\cos \varphi_1 = 0,88$; $K_1 = 87\%$ – КПД электродвигателя РИА; $\cos \varphi_2 = 0,81$; $K_2 = 79\%$ – КПД электродвигателя насоса.

При увеличении частоты вращения ротора увеличивается сила тока и потребляемая мощность РИА. Силу тока и частоту вращения роторов электродвига-

телей РИА и насоса определяли по показаниям частотных преобразователей в установке. Мощность, потребляемая насосом, практически не зависит от частоты вращения ротора РИА n (об/с). Примем, что удельная мощность, диссипируемая в обрабатываемой эмульсии, зависит от частоты вращения ротора и количества проходов через РИА, а также от мощности насоса. Графики зависимости потребляемой мощности РИА от частоты вращения ротора n , показаны на рис. 5.

Расчетный максимальный диаметр частиц эмульсии определяли по формуле (12). Для сравнения с расчетными значениями размера частиц рассматривали результаты анализа проб эмульсии после четырехкратного прохождения через РИА. Так как эмульсия четырехкратно проходила через РИА, в формуле (12)

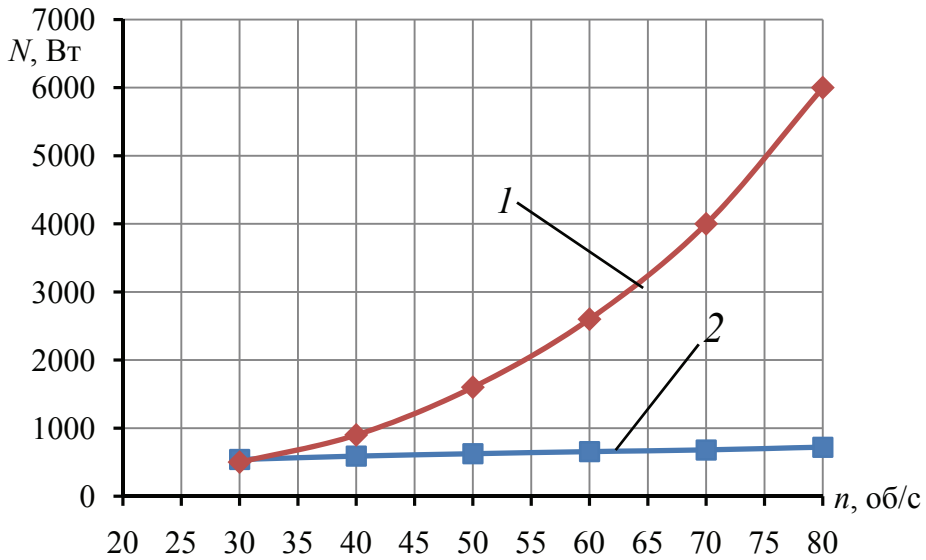


Рис. 5. Зависимость потребляемой мощности от частоты вращения ротора РИА:
1 – РИА-150; 2 – насос

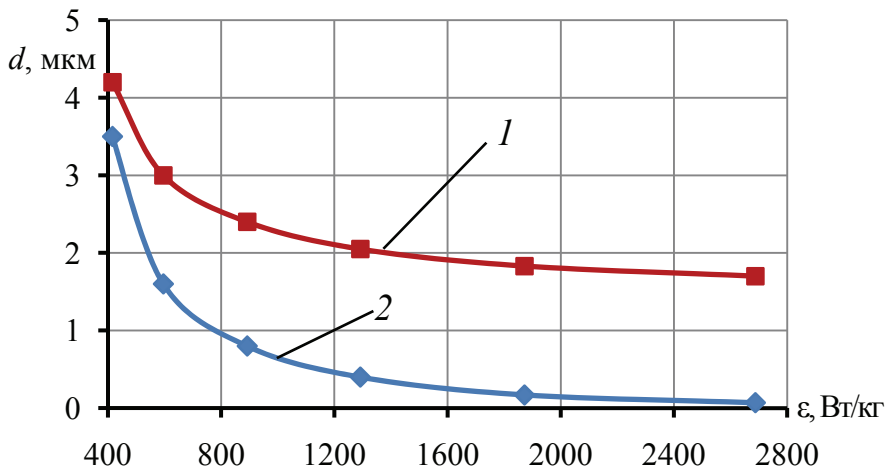


Рис. 6. Графики зависимости размера частиц эмульсии d от удельной мощности ϵ :
1 – расчетные данные для максимального диаметра частиц;
2 – экспериментальные значения среднего диаметра частиц

в расчете принимали значение удельной потребляемой мощности $\varepsilon_{\max} = 4\varepsilon_1$, где ε_1 – удельная мощность при однократном прохождении эмульсии через РИА, Вт/кг. Для подсолнечного масла при температуре 20 °С динамическая вязкость $\mu = 0,056$ Па·с, плотность $\rho = 925$ кг/м³. Плотность дистиллированной воды (дисперсионная среда) при температуре 20 °С $\rho = 1000$ кг/м³. Принимаем для 10%-й эмульсии подсолнечного масла в воде плотность, определяемую по правилу аддитивности, $\rho = 993$ кг/м³. Поверхностное натяжение для капель подсолнечного масла в воде $\sigma \approx 40$ мДж/м² [2].

Необходимо отметить, что по формуле (12) определялся максимальный диаметр частиц, а прибор NICOMP-380ZLS дает расчет среднего диаметра частиц. Как видно из графиков на рис. 6, характер изменения зависимости максимального расчетного диаметра частиц эмульсии d_{\max} (график 1) от величины диссипируемой мощности, идентичен зависимости среднего размера частиц эмульсии, измеренного по пробам эмульсии, обработанной в РИА (график 2). Интенсивный турбулентный режим течения потоков обрабатываемой жидкости для РИА-150 лежит в диапазоне частоты вращения ротора 50...80 об/с (416...2688 Вт/кг). Для этого диапазона эмпирический коэффициент соотношения расчетного максимального диаметра устойчивой частицы эмульсии и среднего диаметра частиц 10%-й эмульсии подсолнечного масла в воде $C_1 \approx 0,2 \pm 0,1$.

Величина эмпирического коэффициента установлена для исследуемой эмульсии и конкретных условий ее обработки. Для точного расчета размера частиц по формуле (12) необходимо учесть всю энергию, которая может быть введена в обрабатываемую эмульсию, что не всегда возможно, так как часть энергии при работе РИА и насоса тратится на механические потери, нагрев жидкости, потери тепла и т.п.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили основные положения методики расчета размера капель эмульсии [4, 5], получаемой при интенсивной турбулентной обработке в РИА. Наибольший и средний размеры капель эмульсии зависят от суммарной диссипируемой мощности в жидкости. В локальном значении диссипируемой энергии следует иметь в виду и кавитационное воздействие, которое также определяется всей мощностью, затрачиваемой на обработку и прокачку эмульсии под давлением через РИА. С увеличением количества проходов эмульсии через активную зону обработки (в РИА) первоначальный размер капель значительно снижается. Тем не менее при увеличении количества проходов эмульсии через РИА тенденция на снижение размера капель замедляется и после определенной эмпирическим путем кратности обработки эмульсии в РИА дальнейшая ее обработка нецелесообразна по энергетическим затратам.

Параметры образцов эмульсии получены на оборудовании Центра коллективного пользования «Получение и применение полифункциональных наноматериалов» (ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»).

Список литературы

1. Tadros, T. F. Emulsions: Formation, Stability, Industrial Applications / T. F. Tadros. – Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, 2016. – 299 p.
2. Зимон, А. Д. Коллоидная химия : учеб. для вузов / А. Д. Зимон. – 3-е изд., доп. и исправл. – М. : Агар, 2003. – 320 с.

3. Брагинский, Л. Н. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, В. Н. Барабаш. – Л. : Химия, 1984. – 336 с.

4. Колмогоров, А. Н. О дроблении капель в турбулентном потоке / А. Н. Колмогоров // Докл. АН СССР. – 1949. – Т. 66, № 5. – С. 825 – 828.

5. Hinze, J.O. Fundamentals of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Processes / J. O. Hinze // AIChE Journal. – 1955. – Vol. 1, No. 3. – P. 289 – 295. doi: 10.1002/AIC.690010303

6. Leng, D. E. Immiscible Liquid–Liquid Systems / D. E. Leng, R. V. Calabrese // In book: Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice / E. L. Paul, V. A. Atiemo-Obeng, S. M. Kresta. – John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2004. – Ch. 12. – P. 639-753.

7. Колмогоров, А. Н. Рассеяние энергии при локально изотропной турбулентности / А. Н. Колмогоров // Докл. АН СССР. – 1941. – Т. 32, № 1. – С. 19 – 21.

8. Обухов, А. М. О распределении энергии в спектре турбулентного потока / А. М. Обухов // Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз. – 1941. – Т. 5, № 4-5. – С. 453 – 466.

9. Колмогоров, А. Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса / А. Н. Колмогоров // Докл. АН СССР. – 1941. – Т. 30, № 4. – С. 299 – 303.

10. Промтов, М. А. Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2015. – 148 с.

Calculation of the Particle Diameter of Emulsion Prepared in a Rotary Pulse Apparatus

M. A. Promtov✉, V. G. Zheludkov, N. Ts. Gatapova, A. Yu. Stepanov

*Department of Technological Processes, Apparatus and Technosphere Safety,
promtov.ma@mail.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: particle size; rotor-stator devise; specific power consumption; processing cycles; rotation frequency; emulsion.

Abstract: The paper considers a method for calculating the maximum diameter of emulsion particles based on the Hinze model, which describes the process of dispersion of emulsion droplets in a turbulent flow using Kolmogorov's theory of locally isotropic turbulence. The maximum size of stable droplets in an emulsion with a low concentration of the dispersed phase depends on its physical parameters and on the power consumption per unit mass of the emulsion. Experimental studies were conducted on the dispersion of sunflower oil in distilled water during processing in a rotor-stator devise (RSD) to obtain 10 % emulsion. Experimental dependences of the average diameter of emulsion particles on the rotor speed and the number of emulsion processing cycles in the RSD were obtained. It was found that for a RSD with a rotor speed of 50...80 rpm, the empirical coefficient of the ratio of the average diameter of particles of the studied emulsion and the calculated maximum diameter of a stable particle of the emulsion is 0.2 ± 0.1 .

References

1. Tadros T.F. *Emulsions: Formation, Stability, Industrial Applications*, Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston. 2016, 299 p.
2. Zimon A.D. *Kolloidnaya khimiya: Uchebnik dlya vuzov* [Colloidal chemistry: Textbook for universities], Moscow: Agar, 2003, 320 p. (In Russ.)
3. Braginskii L.N., Begachev V.I., Barabash V.M., *Peremeshivanie v zhidkikh sredakh. Fizicheskie osnovy i inzhenernye metody rascheta* [Mixing in Liquid Media: Physical Fundamentals and Engineering Computational Methods], Leningrad: Khimiya, 1984, 336 p. (In Russ.)
4. Kolmogorov A.N. [About crushing droplets in a turbulent flow], *Doklady Akademii nauk SSSR* [USSR Academy of Sciences Reports], 1949, vol. 66, no. 5, pp. 825-828. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Hinze J.O. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes, *AIChE Journal*, 1955, vol. 1, no 3, pp. 289-295. doi: 10.1002/AIC.690010303
6. Leng D.E., Calabrese R.V. Immiscible liquid-liquid systems, In book: Paul E.L., Atiemo-Obeng V.A., Kresta S.M. *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2004. Ch. 12, P. 639-753.
7. Kolmogorov A.N. [Energy dissipation in locally isotropic turbulence], *Doklady Akademii nauk SSSR* [USSR Academy of Sciences Reports], 1941, vol. 32, no. 1, pp. 19-21. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Obukhov A.M. [On the distribution of energy in the spectrum of turbulent flow], *Izvestiya AN SSSR. Seriya geografiya i geofizika* [News of the USSR Academy of Sciences. Series Geography and Geophysics], 1941, vol. 5, no. 4-5, pp. 453-466. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Kolmogorov A.N. [The local structure of turbulence in an incompressible fluid at very high Reynolds numbers], *Doklady Akademii nauk SSSR* [USSR Academy of Sciences Reports], 1941, vol. 30, no. 4, pp. 299-303. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Promtov M.A., Stepanov A.Yu., Aleshin A.V. *Metody rascheta kharakteristik rotornogo impul'snogo apparata* [Methods of calculating the characteristics of a rotor-stator device], Tambov: Izdatel'stvo TGTU, 2015, 148 p. (In Russ.)

Berechnung des Partikeldurchmessers der in einer Rotationspulsvorrichtung erhaltenen Emulsion

Zusammenfassung: Der Artikel betrachtet eine Methode zur Berechnung des maximalen Durchmessers von Emulsionspartikeln auf Grundlage des Hinze-Modells, das den Prozess der Dispersion von Emulsionströpfchen in einer turbulenten Strömung unter Verwendung von Kolmogorovs Theorie der lokal isotropen Turbulenz beschreibt. Die maximale Größe stabiler Tröpfchen in einer Emulsion mit einer geringen Konzentration der dispergierten Phase hängt von ihren physikalischen Parametern und vom Stromverbrauch pro Masseneinheit der Emulsion ab. Es sind experimentelle Untersuchungen zur Dispersion von Sonnenblumenöl in destilliertem Wasser während der Verarbeitung in einem Rotationsimpulsapparat (RIA) durchgeführt, um eine zehnpromtente Emulsion zu erhalten. Es sind experimentelle Abhängigkeiten des durchschnittlichen Durchmessers der Emulsionspartikel von der Rotorgeschwindigkeit und der Anzahl der Emulsionsverarbeitungszyklen in RIA ermittelt. Es ist festgestellt, dass bei RIA mit einer Rotorgeschwindigkeit von 50 bis 80 r/s der empirische Koeffizient des Verhältnisses des durchschnittlichen Durchmessers der Partikel der untersuchten Emulsion und des berechneten maximalen Durchmessers eines stabilen Emulsionspartikels $0,2 \pm 0,1$ beträgt.

Calcul du diamètre des particules de l'émulsion obtenue dans l'appareil à impulsions rotatives

Résumé: Est examinée la méthode de calcul du diamètre maximal des gouttes d'émulsion à la base du modèle de Hinze décrivant le processus de dispersion des gouttelettes d'émulsion dans un flux turbulent en utilisant la théorie de la turbulence localement isotrope de Kolmogorov. La taille maximale des gouttelettes stables dans une émulsion à faible concentration en phase dispersée dépend de ses paramètres physiques et de la puissance absorbée attribuée à l'unité de poids de l'émulsion. Sont menées des études expérimentales sur la dispersion de l'huile de tournesol dans de l'eau distillée dans un appareil à impulsions rotatives (AIR) afin d'obtenir une émulsion à 10%. Sont obtenues les dépendances expérimentales du diamètre moyen des particules de l'émulsion sur la vitesse de rotation du rotor et le nombre de cycles de traitement de l'émulsion dans le AIR. Est établi que pour un AIR avec une vitesse de rotation du rotor de 50...80 tr/s, le coefficient empirique du rapport entre le diamètre moyen des particules de l'émulsion étudiée et le diamètre maximal calculé de la particule stable de l'émulsion est de $0,2 \pm 0,1$.

Авторы: *Промтов Максим Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Желудков Владимир Геннадьевич* – аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Степанов Андрей Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.