

УДК 637.134

Б.В. Юрченко, канд. техн. наук, Одес. нац. политехн. ун-т

МЕХАНИЗМ ДРОБЛЕНИЯ ЧАСТИЦ В КАНАЛАХ ГОМОГЕНИЗАТОРА

Б.В. Юрченко. Механiзм дроблення частинок в каналах гомогенiзатора. Показано, що дроблення жирових частинок в клапанних гомогенiзаторах може бути спричинено силами iнерцiї, що виникають внаслідок прискорення частинки на підході до щілини клапану.

B.V. Yurchenko. On the mechanism of particles breaking inside the channels of the homogenizer. It is shown, that the fat particles breaking in the valve homogenizers may be caused by the inertia forces, which appear as the result of the particle acceleration when approaching the valve slit.

По вопросу о механизме дробления жировых частиц в клапанных гомогенизаторах в настоящее время нет единой точки зрения [1]. Каждая из теорий базируется на определенном физическом явлении: кавитации, турбулентности, сдвиге. Вместе с тем не вызывает сомнения, что деформация и разрушение частиц происходят под действием каких-то сил. И одним из факторов, осложняющих понимание процесса, является то, что длина щели гомогенизирующего клапана не влияет на диспергирование. Впервые это было показано Лоо [2] и неоднократно подтверждалось другими исследователями. Это обстоятельство наталкивает на мысль, что дробление происходит не в самой щели, а внутри канала на подходе к ней. Действительно, если средняя величина скорости в подводящем канале не превосходит 10 м/с, то во входном сечении щели она достигает 150...200 м/с.

Изменение скорости не может быть скачкообразным, разгон частиц происходит на каком-то участке траектории. Если этот участок имеет небольшую протяженность, то жировая частица будет подвержена действию достаточно мощных инерционных сил, в результате чего может произойти ее растяжение, а затем и разрыв. Схема диспергирования “растяжение-разрыв” впервые предложена Ребиндером [3], а применительно к гомогенизации молока рассматривалась Виттигом [4]. Последний разделяет весь процесс на “висколизацию”, т.е. растяжение жировых частиц, превращение их в нити и распад нитей — дробление. Однако ни в одной из гипотез не указываются силы, которые вызывают деформацию.

Плотность жировой частицы мало отличается от плотности окружающей жидкости. Поэтому можно считать, что ее скорость практически не отличается от скорости потока, и, следовательно, архимедовой силой и силами вязкого трения можно пренебречь. При этих допущениях на частицу, движущуюся в ускоренном потоке, действует сила инерции $F_{ин}$, стремящаяся ее растянуть, и сила поверхностного натяжения $F_{пн}$, под действием которой жировой шарик стремится сохранить свою форму.

Работа сил инерции может быть представлена как

$$W_{ин} = \rho \frac{\pi d^3}{6} v^2, \quad (1)$$

где ρ — плотность жировой фазы, кг/м³;

d — диаметр частицы, м;

v — скорость на рассматриваемом участке траектории, м/с.

Работа сил поверхностного натяжения

$$W_{пн} = \sigma \Delta S, \quad (2)$$

где σ — поверхностное натяжение, Н/м;

$\Delta S = S_{ц} - S_{ш}$ — изменение поверхности жировой частицы при деформации ее в цилиндр (нить), поверхность которого $S_{ц} = \pi dl$.

Разрушение частицы происходит при условии, когда отношение $l/\pi d_{\text{ц}}$ превышает некоторое критическое значение [3], поэтому длину нити l удобно представить в виде

$$l = k\pi d_{\text{ц}}, \quad (3)$$

где k — коэффициент деформации.

Считая, что объем сферы и нити одинаковы,

$$d_{\text{ц}} = 0,683k^{-1/3}d. \quad (4)$$

Используя (3) и (4), можно записать

$$\Delta S = \pi d^2(1,47k^{1/3} - 1). \quad (5)$$

Условием дробления, т.е. растяжения сферы в цилиндрическую нить, является $W_{\text{нн}} = W_{\text{п.н.}}$.

После подстановок и соответствующих преобразований получаем

$$v \geq \sqrt{\frac{6\sigma}{\rho d}}(1,47k^{1/3} - 1). \quad (6)$$

Для оценки k необходимо ввести дополнительные предположения. В первом приближении можно считать, что нить распадается на две новые сферы одинакового размера. В этом случае

$$d_{\text{нн}} = 1,12d_{\text{г}}, \quad (7)$$

где $d_{\text{нн}}$ и $d_{\text{г}}$ — диаметры негомогенизированной (до дробления) и гомогенизированной жировых частиц, соответственно.

Средний диаметр гомогенизированных частиц $d_{\text{ср}}$ можно определить из формулы, полученной путем обработки известных литературных данных и отличающейся от [5] числовым размерным коэффициентом

$$d_{\text{ср}} = \frac{4,3}{\sqrt{\Delta p}}, \quad (8)$$

где Δp — перепад давления на клапане гомогенизатора, МПа.

Для рабочего давления $p = 20$ МПа $d_{\text{ср}} = 0,96$ мкм.

Следовательно, предыдущий размер (до акта дробления), определенный по (7), равен $d = 1,08$ мкм. Расчеты показывают, что при таком давлении на входе в клапанную щель $v = 180$ м/с. Принимая $\rho = 960$ кг/м³ и $\sigma = 40 \cdot 10^{-3}$ Н/м, из (6) $k^{1/3} = 0,96$.

Это позволяет представить условие дробления в виде

$$v \geq \frac{187}{\sqrt{d}}. \quad (9)$$

Если считать, что исходная жировая частица распадается на 3, 4, 5 либо 6 более мелких, то аналогичные выкладки дают следующие значения коэффициентов в формуле (9): 212, 223, 231, 239, соответственно.

Течение вязкой жидкости на подходе к щели гомогенизатора является трехмерным, и его трудно описать аналитически. В качестве первого приближения следует воспользоваться методом конформных отображений. Учитывая, что течение является осесимметричным, рассмотрим плоскую модель клапана и, исходя из принципа симметрии Шварца [6], задача сводится к движению потока при повороте на угол 90° . В плоскости комплексного переменного $z = x + iy$ канал показан на рис. 1.

Формулы Кристоффеля-Шварца, позволяет осуществить конформное отображение верхней полуплоскости $\zeta = \xi + i\eta$ на внешность многоугольных областей, границы которых состоят

из конечного числа отрезков прямых. Рассматриваемая фигура является четырехугольником, две вершины которого находятся в бесконечности, поэтому нормировка вершин имеет вид

A_k	a_k	α_k
A_1	0	0
A_2	1	1/2
A_3	–	0
A_4	a	3/2

где a_k — точки действительной оси, соответствующие вершинам четырехугольника A_k ;

α_k — внутренние углы, выраженные в долях π .

После подстановки условий нормировки в интеграл Кристоффеля-Шварца

$$z = C \int \left(\frac{\zeta - a}{\zeta - 1} \right)^{0,5} \frac{d\zeta}{\zeta}. \quad (10)$$

Постоянные C и a определяются размерами канала H и h [8]. Давая приращения функциям по бесконечно большому и бесконечно малому радиусам с центром в точке A_2 , можно полу-

чить $C = \frac{H}{\pi}$ и $a = -\left(\frac{h}{H}\right)^2$.

Обозначив $\left(\frac{h}{H}\right)^2 = k\zeta$, тогда

$$z = \frac{H}{\pi} \int \left(\frac{\zeta + k}{\zeta - 1} \right)^{0,5} \frac{d\zeta}{\zeta}. \quad (11)$$

Отобразив полосу шириной π плоскости $w = \phi + i\psi$ на верхнюю вспомогательную полу-плоскость ζ с помощью показательной функции $\zeta = e^w$ и имея в виду, что $d\zeta = e^w dw$, запишем

$$z = \frac{H}{\pi} \int_0^w \left(\frac{e^w + k}{e^w - 1} \right)^{0,5} dw. \quad (12)$$

Выражение (12) устанавливает искомую связь между плоскостями комплексного переменного z и w . Так, для вершины A_1 на вспомогательной плоскости $\zeta = 0$, но $\zeta = e^w$, следовательно, на плоскости w она попадает в точку $w = -\infty$. Аналогично можно определить положение других вершин.

Для нахождения уравнений линий тока необходимо проинтегрировать (12). Опуская промежуточные выкладки и имея в виду, что для гомогенизирующего клапана величина h/H пренебрежимо мала, получаем

$$z = \frac{H}{\pi} \ln \left(\frac{1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon} \right), \quad (13)$$

где $\varepsilon = \sqrt{1 - e^w}$. (14)

Модуль скорости в любой точке канала при расходе Q определяется из соотношения

$$|v| = \frac{Q}{\pi} \left| \frac{dw}{dz} \right|.$$

Имея в виду, что $\frac{dw}{dz} = \frac{\pi}{H} \varepsilon$, получаем

$$v = \frac{Q}{H} \varepsilon, \quad (15)$$

где Q — расход в канале на единицу глубины.

Поскольку $v = u_x + iu_y$, то, разделяя действительную и мнимую части, можно найти компоненты скорости, тогда

$$v = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}. \quad (16)$$

Расчет траектории движения частицы выполнен для средней линии тока $\psi = \frac{\pi}{2}$. Он производится в следующем порядке: задаются значением потенциала скорости φ и вычисляют e^w (при $\psi = \frac{\pi}{2}$ $e^w = ie^{\varphi}$). По формуле (13) вычисляется z , и так как $z = x + iy$, то и координаты частицы в канале x и y . Модуль скорости рассчитывают по формуле (16). При выполнении расчетов полуширина канала H была принята равной 5 мм, высота щели $h = 250$ мкм. Средняя скорость течения в канале $\frac{Q}{H} = 10$ м/с, что примерно соответствует реальным условиям. Траектория движения частицы в подводящем канале клапана показана на рис. 2. Путь, проходимый ею в интервале изменения φ от φ_1 до φ_2 можно найти из соотношения:

$$s = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (16)$$

На рис. 3 приведена зависимость $v = f(s)$ и указаны диаметры жировых частиц, которые могут существовать при этих условиях. Из графика следует, что силы инерции, развивающиеся при разгоне частиц в подводящем канале, оказываются достаточными для их растяжения и дробления. Следовательно, молоко гомогенизируется еще до входа в клапанную щель. Роль самой щели сводится лишь к тому, что она создает условия, способствующие движению частиц с ускорением. Поскольку режим течения не влияет на разгон частиц, то предлагаемая модель дробления объясняет результаты опытов Фиппса [7], который, повысив вязкость молока добавкой глицерина, показал, что как при турбулентном, так и при ламинарном режимах течения в щели опытные точки, характеризующие степень дробления, укладываются на одну прямую. В опытах Фиппса, к сожалению, не проводилось измерения поверхностного натяжения на границе фаз, но изменение его, по-видимому, не было столь большим, чтобы нарушать условие дробления.

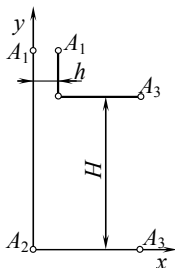


Рис. 1. Расчетная схема щели клапана

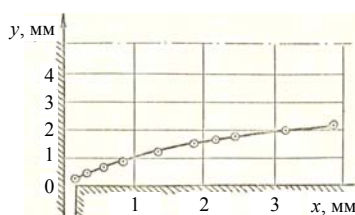


Рис. 2. Траектория движения частицы в подводящем канале клапана

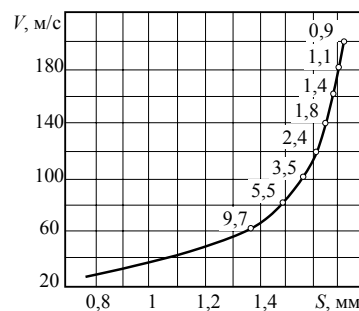


Рис. 3. Изменение скорости и диаметра жировых частиц на пути разгона

Критически оценивая рассмотренную гипотезу, нельзя не отметить, что процесс гомогенизации носит статистический характер. Получаемый при обработке результатов опытов средний диаметр жировых частиц характеризует динамическое равновесие в одновременно протекаю-

щих процессах дробления и коалесценции. С этих позиций условие дробления (9) отражает лишь энергетические затраты на гомогенизацию в клапанах обычной конструкции. Предотвращение слипания уже раздробленных частиц может заметно повысить экономичность процесса. Формально это означает, что в формуле (9) для клапанов, в конструкции которых реализованы такие меры, числитель будет меньше.

Расчеты движения жировых частиц в подводящем канале клапана гомогенизатора показывают, что на коротком участке подхода к щели возникают условия, при которых может происходить их дробление.

Литература

1. Walstra W. Preliminary Note on the Mechanism of Homogenization // Netherlands Milk Dairy Journal. — 1969. — Vol. 23. — P. 290.
2. Loo C. Letters of the Editor on “The cavitation Theory of Homogenization” by McKillop and others // J. of Dairy Science. — 1955. — Vol. 38. — 932.
3. Рибендер П.А. К теории образования эмульсии // Коллоид. журн., 1946. — Т. 8, вып. 3. — С. 157 — 173.
4. Материалы XII Междунар. конгресса работников молочного дела. — 1951. — Т 1. — С. 113.
5. Барановский Н.В. Влияние гидравлических факторов на степень дисперсности жира при гомогенизации молока: Автореф. дис.... канд. техн. наук. — М.: МТИММП, 1955. — 16 с.
6. Лаврентьев М.А. Методы теории функций комплексного переменного / Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. — М.: Наука, 1965. — 716 с.
7. Phipps L. Mechanism of oil Droplet Fragmentation in High Pressure Homogenizers // Nature. — 1971. — Vol. 233. — P. 617.

Поступила в редакцию 11 декабря 2006 г.