

УДК 66.084.2

Возможности реализации эффектов кавитации для измельчения пищевого сырья

Д-р техн. наук Г. В. АЛЕКСЕЕВ, Е. А. ГРИШАНОВА (ДАНИЛЕНКО),
А. В. КОНДРАТОВ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО
Институт холода и биотехнологий

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

М. В. ГОНЧАРОВ

Филиал ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, 1

In work is considered model of the origin kavitacii effect. Got analytical correlations prescribed in base of the analysis of the use them in real technological equipment for realization kavitacii pulverizing food produktov rotor-pulsed device.

Keywords: hydraulic resistance, kavitacii, criteria homogenize and Reynoldisa, rotor-pulsed device.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, кавитация, критерии гомохронности и Рейнольдса, роторно-импульсный аппарат.

Известно, что в начальный момент времени, когда гидравлическое сопротивление велико, а скорость среды мала, зависимость скорости от времени линейна [1]:

$$v(t) = \left(\frac{\Delta P}{\rho l_3} + \frac{\omega^2 R_p^2}{2l_3} \right) t + v(0). \quad (1)$$

Перейдем от размерных переменных v и t к соответствующим безразмерным переменным:

$$v = v_0 w; \quad t = t_0 \tau$$

Тогда уравнение (1) примет вид:

$$l_3 \frac{dw}{d\tau} \frac{v_0}{t_0} + \frac{1}{2} w^2 v_0^2 \xi(\tau) + v_0 w \frac{Bv}{2d} = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\omega^2 R_p^2}{2}. \quad (2)$$

Умножим каждое слагаемое обеих частей уравнения на величину $\frac{t_0}{l_3 v_0}$, получим:

$$\frac{dw}{d\tau} + w^2 \text{Ho}_1 \xi(\tau) + w \frac{B}{\text{Re}_1} = \text{Ho}_1 \text{Eu} + \frac{1}{\text{Ho}_2}. \quad (3)$$

Критерии, входящие в уравнение, имеют следующий вид:

— критерий продольной гомохронности

$$\text{Ho}_1 = \frac{v_0 t_0}{2l_3}; \quad (4)$$

— критерий поперечной гомохронности

$$\text{Ho}_2 = \frac{\omega^2 R_p^2 t_0}{2l_3 v_0}; \quad (5)$$

— критерий Эйлера

$$\text{Eu} = \frac{2\Delta P}{\rho v_0^2}; \quad (6)$$

— критерий Рейнольдса

$$\text{Re}_1 = \frac{2dl_3}{vt_0}. \quad (7)$$

Масштабы скорости и времени

$$v_0 = \frac{\Delta P t_0}{\rho l_3}, \quad t_0 = \frac{2r_c}{\omega R_p}, \quad (8)$$

где r_c — радиус канала статора;

ω — угловая скорость ротора;

R_p — радиус ротора.

Тогда критерий поперечной гомохронности

$$\text{Ho}_2 = \frac{2v_0 t_0 l_3}{(2r_c)^2}.$$

Учитывая, что не все критерии являются независимыми

$$\text{Ho}_2 = \text{Ho}_1 \left(\frac{2l_3}{2r_c} \right)^2 = \text{Ho}_1 \left(\frac{l_3}{r_c} \right)^2,$$

$$\text{Re}_1 = \frac{1}{\text{Ho}_1} \frac{dv_0}{v} = \frac{\text{Re}_2}{\text{Ho}_1}.$$

Уберем индексы у критериев гомохронности и Рейнольдса и запишем безразмерное критериальное уравнение:

$$\frac{dw}{d\tau} + w^2 \text{Ho} \xi(\tau) + w B(\tau) \frac{\text{Ho}}{\text{Re}} = \text{Ho} \cdot \text{Eu} + \frac{1}{\text{Ho}} \left(\frac{l_3}{r_c} \right)^2. \quad (9)$$

Для решения этого уравнения необходимо определить коэффициент гидравлического сопротивления. По мнению некоторых исследователей, регулирующие устройства, сужающие поток жидкости, в гидравлическом отношении эквивалентны диафрагме. В зависимости от скорости потока можно выделить две области изменения гидравлического сопротивления (формула Альтшуля) [2]:

$$\xi^{(r)} = \xi(\tau) + \frac{B(t)}{\text{Re}}, \quad (10)$$

где $\xi(t)$ — коэффициент гидравлического сопротивления в квадратичной области зависимости гидравлических потерь от скорости потока;

$B(t)$ — коэффициент гидравлических потерь,

определяемый из таблиц Альтшуля

$$\xi(t) = \left(\frac{S_0}{\varepsilon S(t)} - 1 \right)^2, \quad (11)$$

здесь $S(t)$ — площадь проходного сечения системы каналов ротора и статора; ε — коэффициент, определяемый из таблицы Н. Е. Жуковского.

Таблица Жуковского

$S(t)/S_0$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
ε	0,611	0,612	0,616	0,622	0,633	0,644
$S(t)/S_0$	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
ε	0,662	0,687	0,722	0,781	1,000	

Аппроксимируя данные таблицы, получим функцию

$$\varepsilon(S) = \left(\frac{4,5}{e^S} - 2,88e^S + 7,17S \right)^{-1}. \quad (12)$$

В процессе открывания канала статора обрабатываемая среда в прерывателе аппарата разгоняется, а ее скорость на начальном интервале времени (t_0) увеличивается по закону

$$v(t) = v(0) + \frac{\Delta P}{\rho l_3} t, \quad (13)$$

причем период истечения имеет следующий вид:

$$2t_0 = \frac{2d}{\omega R_p}. \quad (14)$$

Таким образом, при $v(0) \ll \Delta P t_0 / \rho l_3$ величину $\Delta P t_0 / \rho l_3$ можно назвать средней скоростью. Эта величина может быть выбрана в качестве масштаба скорости при построении критериев подобия рассматриваемого процесса. В качестве масштаба времени целесообразно выбрать величину, равную полупериоду модуляции скорости и площади проходного сечения модулятора.

При таких значениях масштабов, произведение критериев Eu и Ho равно единице, и уравнение (9) упрощается

$$\frac{dw}{dt} + w^2 Ho \xi(\tau) + w B(t) \frac{Ho}{Re} = 1 + \frac{1}{Ho} \left(\frac{l_3}{r_c} \right)^2. \quad (15)$$

Обозначая $(l_3/r_c)^2 = Ro$ как ротационный коэффициент, учитывающий вращение обрабатываемой среды в полости ротора, запишем уравнение движения обрабатываемой среды в каналах роторного аппарата

$$\frac{dw}{d\tau} + w^2 Ho \xi(\tau) + w B(\tau) \frac{Ho}{Re} = 1 + \frac{Ro}{Ho}. \quad (16)$$

Уравнение (16) решается методом Рунге—Кутты. Начальные условия для ускорения при $\tau = 0$:

$$\frac{dw}{d\tau} = 0,$$

а для скорости — из решения уравнения (16) при нулевом ускорении

$$Ho \xi(0) w^2 + B(0) \frac{Ho}{Re} w - \left(1 + \frac{Ro}{Ho} \right) = 0,$$

$$w(0) = (-HoB(0)/Re \pm \sqrt{Ho^2 B(0)^2 / Re^2 +$$

$$4Ho \xi(0)(1 + Ro/Ho)) / (2Ho \xi(0)) \quad (17)$$

Отрицательный корень в данном случае не учитываем, т. к. течение жидкости навстречу перепаду давления невозможно.

Поскольку под кавитацией в жидкости понимают образование заполненных паром и газом полостей или пузырьков при локальном понижении давления в жидкости до давления насыщенных паров, необходимо отметить, что понижение давления в жидкости до давления насыщенных паров возможно также при кипении или вакуумировании жидкости.

Чтобы в жидкости образовалась полость, необходимо раздвинуть ее соседние молекулы на расстояние не менее удвоенной длины промежутка между ними. В реальных жидкостях прочность меньше теоретической за счет наличия различных примесей и включений, которые являются зародышами кавитации. Согласно теоретическим представлениям маленькие пузырьки должны растворяться в жидкости, а большие — всплывать. Очень маленькие пузырьки стабилизируются на поверхностях и в трещинах малых твердых частиц, взвешенных в жидкости. Под действием звукокапиллярного эффекта и интенсивных микропотоков жидкость проникает в поры и трещины, где при захлопывании кавитационных пузырьков возникает мощная ударная волна, способствующая разрушению материалов. Кумулятивные струйки, возникающие при схлопывании кавитационных пузырьков, разрушают поверхность твердого тела за счет кинетической энергии жидкости. Мелкие частицы твердого тела, размеры которых соизмеримы с поперечным сечением кумулятивных струй, увлекаются ими и дают дополнительный вклад в процесс разрушения твердых частиц, находящихся в жидкости.

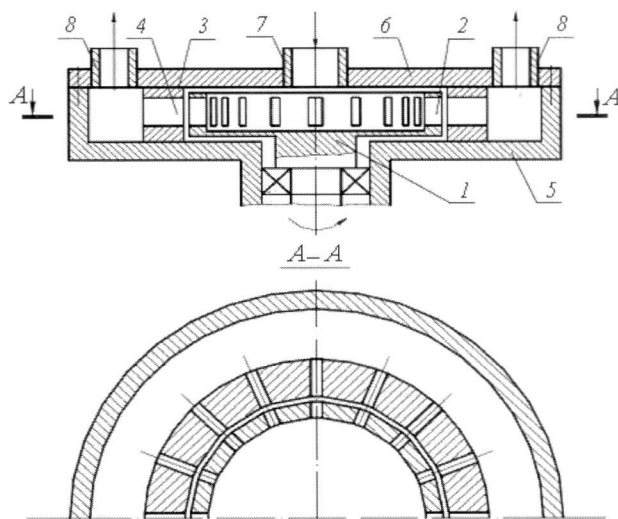


Схема роторно-импульсного аппарата:

1 — ротор; 2 — каналы ротора; 3 — статор; 4 — каналы статора; 5 — корпус; 6 — крышка; 7 — входной патрубок; 8 — выходной патрубок

Рассмотрим кавитационные явления, возникающие в роторно-импульсном аппарате (РИА). Принципиальная схема работы РИА показана на рисунке.

Обрабатываемая жидкость под давлением или самотеком через входной патрубок 7 подается в полость ротора 1, проходит через каналы ротора 2, каналы статора 4, рабочую камеру, образованную корпусом 5 и крышкой 6 и выходит из аппарата через выходной патрубок 8.

При вращении ротора, его каналы периодически совмещаются с каналами статора. Выходя из каналов статора, жидкость собирается в рабочей камере и выводится через выходной патрубок. В период времени, когда каналы ротора перекрыты стенкой статора, в полости ротора давление возрастает, а при совмещении канала ротора с каналом статора давление за короткий промежуток времени сбрасывается и в результате этого в канал статора распространяется импульс давления. Скорость потока жидкости в канале статора является переменной величиной. При распространении в канале статора импульса избыточного давления, вслед за ним возникает кратковременный импульс пониженного (отрицательного) давления, так как совмещение каналов ротора и статора завершилось, и подача жидкости в канал статора проис-

ходит только за счет «транзитного»-течения из радиального зазора между ротором и статором. Объем жидкости, вошедший в канал статора, стремится к выходу из канала и инерционные силы создают растягивающие напряжения в жидкости, что вызывает кавитацию. Кавитационные пузырьки растут при понижении давления до давления насыщенных паров обрабатываемой жидкости при данной температуре и схлопываются или пульсируют при увеличении давления в канале статора.

Описанная картина возникновения кавитационных эффектов вполне соответствует рассмотренной выше модели, которая может быть положена в основу проектирования реального технологического оборудования для измельчения пищевого сырья.

Список литературы

1. Алексеев Г. В., Верболоз Е. И., Даниленко Е. А., Кондратов А. В. Изучение кавитационных механизмов разрушения для использования в технологическом оборудовании // ЭНЖ «Процессы и аппараты пищевых производств». 2011. Вып. 2.
2. Альтишль А. Д., Животовский Л. С., Иванов Л. П. Гидравлика и аэродинамика. — М.: Стройиздат, 1987.