

УДК 66.084.2

## ИЗУЧЕНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

Алексеев Г.В., Верболоз Е.И., Даниленко Е.А., Кондратов А.В.  
(Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий)

*В работе рассмотрены основные механизмы возникновения кавитационных эффектов и основные параметры среды, которые на них влияют. Сформированы положения математической модели, достаточно полно отражающей основные закономерности нестационарных гидромеханических процессов в прерывателе роторного аппарата.*

Ключевые слова: кавитация, диспергирование, гомогенизация, растворение, экстрагирование, абсорбция, нестационарные гидромеханические процессы.

## STUDY KAVITACIONNYH MECHANISM of the DESTRUCTION FOR USE In TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Alexeev G.V., Verboloz E.I., Danilenko E.A., Kondratov A.V.  
(SANKT-PETERSBURG state university lav and food technology)

In work are considered main mechanisms of the origin kavitaci effekt and the main parameters of the ambience, which on they affect. They Are Formed place;put;lay-thread to mathematical model, it is enough packed reflecting main regularities unstabilizability hydrometer of the processes in breaker rotor device.

Keywords: kavitaci, dispersion, homogenize, dissolution, extract, absorption, unstabilizability hydrometer processes.

Акустическая кавитация представляет собой эффективное средство концентрации энергии звуковой волны низкой плотности в высокую плотность энергии, связанную с пульсациями и захлопыванием кавитационных пузырьков. В фазе разрежения акустической волны в жидкости образуется разрыв в виде полости, которая заполняется насыщенным паром данной жидкости. В фазе сжатия под действием повышенного давления и сил поверхностного натяжения полость захлопывается, а пар конденсируется на границе раздела фаз. Через стены полости в нее диффундирует растворенный

в жидкости газ, который затем подвергается сильному адиабатическому сжатию. В момент схлопывания, давление и температура газа достигают значительных величин (по расчетным данным до 100 МПа и 1000°C). После схлопывания полости в окружающей жидкости распространяется сферическая ударная волна, быстро затухающая в пространстве [1].

Акустическая кавитация в жидкостях инициирует различные физико-химические явления; сонолюминесценцию (свечение жидкостей); химические эффекты (звукохимические реакции); эрозию твердого тела (разрушение поверхности); диспергирование (измельчение твердых частиц в жидкости) и эмульгирование (смешивание и гомогенизация несмешивающихся жидкостей).

Сонолюминесценция и звуковые химические реакции являются генетически связанными процессами, могут оказывать взаимное влияние, но в принципе они могут осуществляться независимо один от другого. Ультразвуковая люминесценция и свечение, возникающее при гидродинамической кавитации, являются близкими по своей природе процессами.

В кавитационную полость могут проникать пары воды, растворенные газы, а также вещества с высокой упругостью пара и не могут проникать ионы или молекулы нелетучих растворенных веществ. Выделяющейся в процессе схлопывания пузырька энергии достаточно для возбуждения, ионизации и диссоциации молекул воды, газов и веществ с высокой упругостью пара внутри кавитационной полости. На этой стадии любой из присутствующих газов является активным компонентом, участвуя в передаче энергии возбуждения, перезарядке и других процессах. Действие звукового поля на вещества, проникающие в полость, является непосредственным, прямым, причем действие газов  $O_2$ ,  $H_2$  и  $N_2$  в кавитационной полости двойственное:

во-первых,  $O_2$  и  $H_2$  участвуют в реакциях трансформирования радикалов:



а  $N_2$  – в газовых звукохимических реакциях, конечным результатом которых является фиксация азота:



во-вторых, химически активные газы, проникая в кавитационную полость, участвуют, так же как и благородные газы, в передаче энергии электронного возбуждения молекулам воды, а также в процессе перезарядки.

При схлопывании кавитационного пузырька в раствор переходят радикалы  $H^\circ$ ,  $OH^\circ$ , ионы и электроны малой энергии, образовавшиеся в газовой

фазе при расщеплении молекулы  $\text{H}_2\text{O}$  и веществ с высокой упругостью пара, продукты их взаимодействия и частичных рекомбинаций, а также метастабильные возбужденные молекулы  $\text{H}_2\text{O}$ .

Суммарную схему кавитационного расщепления молекул воды представляют в следующем виде:



возникающие в системе активные частицы после перехода в раствор сольватируются и реагируют с растворенными веществами. На этой стадии, когда осуществляются косвенные действия акустических колебаний, на ход процесса могут оказывать влияние практически только химически активные газы –  $\text{O}_2$  и  $\text{H}_2$ .

В конечном счете, воздействие кавитации на водные растворы сводится к единственному процессу – расщеплению молекул воды в кавитационных пузырьках. Независимо от природы растворенных веществ, звук действует на одно вещество – на воду, что приводит к изменению ее физико-химических свойств: увеличению рН, электропроводности воды, увеличению числа свободных ионов и активных радикалов, структуризации и активации молекул.

Таким образом, кавитация является мощным интенсифицирующим фактором в процессах диспергирования, гомогенизации, растворения, экстрагирования, абсорбции и других массообменных процессах. Математической моделью, достаточно полно отражающей основные закономерности нестационарных гидромеханических процессов в прерывателе роторного аппарата, образованном каналом ротора и статора и радиальным зазором между ними, является уравнение Бернулли, записанное с учетом нестационарности потока [2]:

$$\beta l \frac{dv}{dt} + \lambda l \frac{v^2}{2d} + \zeta \frac{v^2}{2} + \frac{Bvv}{2d} = \frac{\Delta P}{\rho} \quad (1)$$

Где  $\beta$  – коэффициент количества движения потока обрабатываемой среды (для инженерных расчетов можно принять равным единице);  $v$  – мгновенное значение средней по сечению канала статора скорости;  $\rho$  – плотность обрабатываемой среды;  $l$  – длина модулятора (прерывателя);  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления трения;  $d$  – диаметр каналов ротора и статора;  $\Delta P$  – перепад давления на модуляторе;  $\zeta$  – суммарный коэффициент местного гидравлического сопротивления;  $B$  – коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий потери напора, зависящий от

скорости потока;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости обрабатываемой среды.

Уравнение (1) отличается от обычного уравнения Бернулли тем, что коэффициенты  $\lambda$  и  $\zeta$  являются «нестационарными». Они зависят от времени в соответствии с изменением распределения скоростей, турбулентных пульсаций и среднерасходной скорости обрабатываемой среды.

Учитывая, что потери давления, рассчитанные с учетом нестационарности касательного напряжения на стенке канала, всего на несколько процентов больше потерь давления, рассчитанных для стационарного случая, примем коэффициент  $\lambda$  равным стационарной величине. В исследованиях нестационарных гидромеханических процессов в коротких трубках с местным гидравлическим сопротивлением, получено, что при использовании стационарных значений коэффициента сопротивления максимальная ошибка при расчете мгновенных средних по сечению скоростей течения не превышает 20%. Таким образом, уравнение (1) принимает вид:

$$l \frac{dv}{dt} + \frac{1}{2} \left( \lambda l \frac{v^2}{d} + \zeta(t) v^2 + \frac{Bvv}{d} \right) = \frac{\Delta P}{\rho} \quad (2)$$

Давление, генерируемое выходным отверстием канала статора, в фазе положительного давления несколько тормозит движение жидкости. Аналогичное действие оказывает и давление, генерируемое входным отверстием канала ротора, т.к. работает в противофазе с выходным отверстием, тогда уравнение (2) переписывается в виде:

$$\left[ l + (1 + \Gamma) \sqrt{\frac{S_0}{\pi}} \right] \frac{dv}{dt} + \frac{1}{2} \left( \zeta(t) v^2 + \frac{Bvv}{d} \right) = \frac{\Delta P}{\rho} \quad (3)$$

$\Gamma$  – отношение площади выходного отверстия канала статора к площади входного отверстия канала ротора, в нашем случае  $\Gamma = 1$ .

Из уравнения (3) видно, что учет влияния генерируемого переменного давления на нестационарные гидромеханические процессы в прерывателе аппарата сводится к увеличению эффективной длины модулятора до величины

$$l_s = l + (1 + \Gamma) \sqrt{S_0/\pi}$$

$S_0$  – площадь выходного отверстия канала статора:

$$S_0 = \pi r^2$$

Также необходимо учесть давление, возникающее из-за вращения среды в полости ротора и действующих при этом центробежных сил инерции:

$$\Delta P_{цб} = \rho \omega^2 R_p^2 / 2$$

Тогда 2.4 сводится к виду:

$$l_s \frac{dv}{dt} + \frac{1}{2} \left( \xi(t)v^2 + \frac{Bvv}{d} \right) = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\omega^2 R_p^2}{2} \quad (4)$$

$\xi(t)$  – коэффициент местного гидравлического сопротивления;  $B(t)$  – коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий потери напора, линейно зависящие от скорости потока.

Таблица 1 – Коэффициент гидравлического сопротивления

$S(t)/S_0$	1,00	0,75	0,50	0,25
$B$	75	350	1300	3000

При аппроксимации таблицы получили функцию:

$$B(s) = \exp(-10,58 \cdot s^2 + 8,18 \cdot \exp(s) - 7,34 \cdot s) \quad (5)$$

Суммарный перепад давления на прерывателе роторного аппарата:

$$\Delta P_{\Sigma} = P_{cm} + \rho \omega^2 R_p^2 / 2 - P_c, \quad (6)$$

Где  $P_{cm}$  – статическое давление, создаваемое насосом;  $P_c$  – давление в камере статора

$$P_{cm} - P_c = \Delta P$$

Из уравнения (4) можно сделать вывод, что в начальный интервал времени, когда гидравлическое сопротивление велико, а скорость среды мала, зависимость скорости от времени линейна:

$$v(t) = \left( \frac{\Delta P}{\rho l_s} + \frac{\omega^2 R_p^2}{2l_s} \right) \cdot t + v(0) \quad (7)$$

Список литературы:

1. Альтшуль А.Д., Животовский Л.С., Л. П., Иванов Л.П. Гидравлика и аэродинамика, м., Стройиздат, 1987, 414 с.
2. Алексеев Г.В., Даниленко Е.А., Кондратов А.В. Возможности реализации эффектов кавитации для измельчения пищевого сырья, ЭНЖ «Процессы и аппараты пищевых производств», 2011, №2, с.16-22