

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПАРОВОЙ ВНУТРИКАПЕЛЬНОЙ КАВИТАЦИИ

С.В.Титов, И.В. Ершов

Приведены результаты численного эксперимента по исследованию динамики роста парового кавитационного зародыша в жидкости. Показано, что этот процесс может привести к практически мгновенному разрушению капли в результате объемного микровзрыва.

Известно, что для газификации моторных топлив необходима температура свыше 1200-1500 К [1]. Это значительно усложняет конструкцию и сокращает ресурс термических газовых генераторов.

Акустическая кавитация, как способ концентрации энергии в звуковом поле является одним из самых мощных инструментов химического и физического воздействия на вещество [2, 3, 4]. Считается, что в процессе кавитации в микрообъемах жидкости имеют место процессы, тождественные состоянию низкотемпературной плазмы [2]. Хроматографический анализ продуктов полученных в результате кавитационной обработки различных углеводородов показал появление в них водорода и легких газообразных продуктов (метана, этана, этилена и др.) [5]. Процесс газификации протекает значительно более интенсивно, если жидкость будет распыливаться в нагретой газовой осциллирующей среде [6, 7, 8].

В соответствии с классификацией, предложенной Блейком различают два вида кавитации – газовую и паровую.

В газовой кавитации рост ядер зародышей происходит вследствие процесса диффузии газа из окружающей жидкости в обычных условиях.

Паровая кавитация имеет место в криогенных и обычных жидкостях, которые находятся вблизи состояния кипения.

Такая классификация является условной, т.к. в действительности процесс паровой кавитации всегда сопровождается диффузией газа внутрь пузырька. Однако если диффузионные процессы протекают медленно, то паровой пузырек способен расширяться настолько быстро, что процесс диффузии не успевает оказывать заметного влияния на скорость роста кавитационного пузырька.

Экспериментальные исследования динамики развития паровых кавитационных пузырьков в капле связано со значительными техническими трудностями. Поэтому, для предварительной качественной оценки этого

процесса используем возможности численного моделирования.

Если, принять диаметр капли 10^{-5} м, а диаметр кавитационного пузырька 10^{-7} м, то видно, что их размеры отличаются на два порядка. Поэтому, условно на начальном этапе исследования примем модель эволюции кавитационного зародыша внутри капли, как в безграничной жидкости.

Будем считать, что давление паров жидкости внутри пузырька не зависит от времени и равно давлению насыщенного пара $P_{\text{н}}$, а вне капли топлива давление равно атмосферному P_0 .

Условие равновесия пузырька (при отсутствии процесса диффузии газа из жидкости внутрь кавитационного зародыша), который содержит только пары жидкости можно записать в виде:

$$P = P_{\text{н}} - P_0, \quad (1)$$

где P – давление в капле;
 $P_{\text{н}}$ – давление насыщенных паров;
 P_0 – атмосферное давление.

Допустим, что жидкость в капле является несжимаемой, невязкой и нетеплопроводной. Пока также не будем также учитывать и величину поверхностного натяжения на границах капля – газовая среда и капля – кавитационный зародыш.

Тогда движение границы кавитационного пузырька можно представить в виде следующего известного дифференциального уравнения [9].

$$R \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 = \frac{P}{\rho}. \quad (2)$$

Примем следующие начальные условия:

– время $t = 0$; (3)

– начальный радиус кавитационного пузырька в начальный момент

$$R_{(t=0)} = R_0, \quad (4)$$

где: R_0 – радиус кавитационного пузырька;

– скорость движения границы кавитационного пузырька в начальный момент

$$\dot{R}_{(t=0)} = 0. \quad (5)$$

Проинтегрировав уравнение (2) для указанных начальных условий получим уравнение для скорости границы парового пузырька

$$\dot{R}^2 = \frac{2P}{3\rho} \left(1 - \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \right), \quad (6)$$

и ускорение границы парового пузырька

$$\ddot{R} = \frac{P}{\rho} \frac{R_0^3}{R^4}. \quad (7)$$

Введем безразмерные переменные. Для размера капли

$$\tilde{R} = \frac{R}{r}, \quad (8)$$

здесь: R – текущий радиус капли;
 r – характерный радиус капли.

Для времени

$$\tilde{t} = \frac{t}{\tau}, \quad (9)$$

здесь: t – текущее время;

τ – характерное время процесса.

Отношение радиусов кавитационного зародыша и капли обозначим

$$\alpha = \frac{R_0}{r}. \quad (10)$$

Примем $\alpha = 0,01$.

В этих переменных уравнения (6) и (7) примут вид

$$\frac{d\tilde{R}}{d\tilde{t}} = \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{\tilde{R}} \right)^3}, \quad (11)$$

$$\frac{d\tilde{R}^2}{d\tilde{t}} = \frac{\alpha^3}{\tilde{R}^4}. \quad (12)$$

Численные исследования выполнялись в пакете Math Cad 2001i Pro.

Результаты численного исследования представлены на рисунках 1 – 3

Здесь $\tilde{t}$ – отношение текущего времени к характерному времени процесса, $\tilde{R}$ – отношение текущего радиуса капли к его характерному радиусу.

Из рисунка 1 видно, что начальный момент времени $\tilde{R} = 0,01$. Затем, размер кавитационного пузырька резко увеличивается (на

два порядка) и становится соизмерим с размером капли.

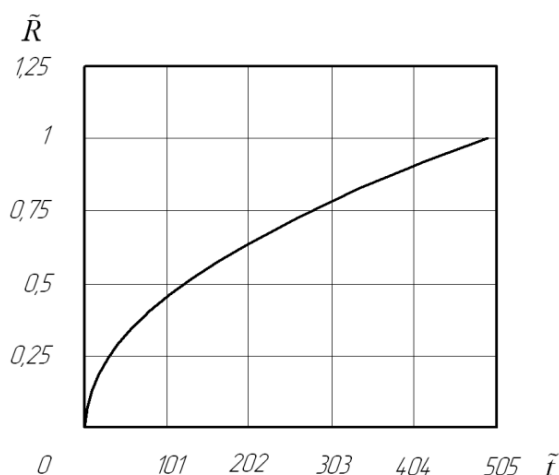


Рис. 1. Зависимость изменения радиуса кавитационного пузырька по времени

На рисунке 2 показана динамика изменения скорости кавитационного пузырька в зависимости от времени

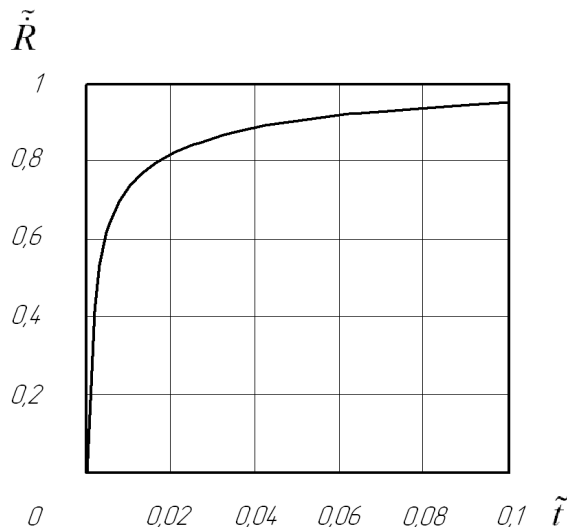


Рис. 2. Динамика изменения скорости роста кавитационного пузырька по времени

Здесь относительная скорость; $\tilde{t}$ – относительное время процесса, а $\tilde{R}$ – скорость роста.

Из рисунка 2.3 видно, что в начальный момент времени, в соответствии с принятыми начальными условиями, скорость роста пузырька равна нулю. Затем она мгновенно возрастает до некоторого постоянного значения близкого единице.

Особый интерес представляет исследование зависимости изменения давления $\tilde{P}$ в

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПАРОВОЙ ВНУТРИКАПЕЛЬНОЙ КАВИТАЦИИ

паровом кавитационном пузырьке от расстояния до границы капли $\tilde{r}$ для различных значений $\frac{\tilde{R}}{\alpha}$. Это позволит проследить траекторию движения пузырьков внутри капли.

На рисунке 3 графически изображена зависимость изменения давления от расстояния от границы пузырька до границы капли.

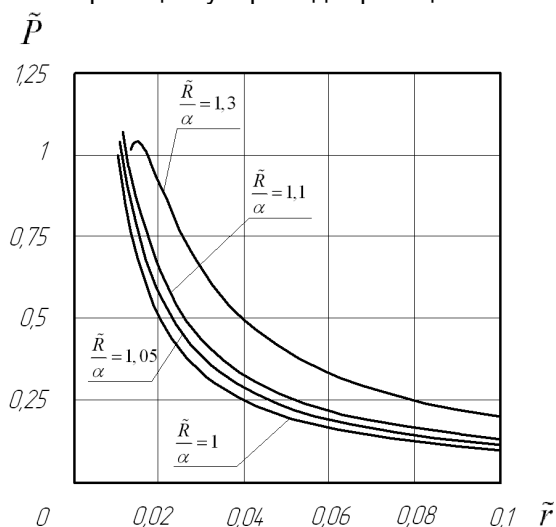


Рис. 3. Зависимость изменения давления в газовом пузырьке от расстояния от границ пузырька и капли. Где $\tilde{P}$ – безразмерное давление внутри жидкости; $\tilde{r}$ – относительное расстояние от границы пузырька

В результате анализа графиков приведенных на рисунке 3 можно отметить следующее:

- наибольшее значение давления в капле жидкости будет иметь место у границы газового пузырька и наименьшее у границы капли;

- с увеличением относительного размера капли $\frac{\tilde{R}}{\alpha}$ – относительное давление в ней повышается.

Это означает, что паровые кавитационные пузырьки под действием избыточного давления в капле будут перемещаться от центра к периферии. Во время их движения возможен процесс соединения отдельных мелких кавитационных пузырьков в более крупные.

В связи с тем, что скорость движения кавитационных пузырьков в центре будет выше чем на периферии, то и процесс соединения пузырьков в центре капли будет происходить более интенсивно. Следовательно, с большей долей вероятности следует ожидать, что будет иметь место не одиночные прорывы кавитационных пузырьков за пределы капли, а их соединение внутри капли в отдельные их микрообъемы с последующим их слиянием. Это может привести к практически мгновенному разрушению капли в результате объемного микровзрыва.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Смаль Ф.В., Арсенов Е.Е. Перспективные топлива для автомобилей. - М.: Транспорт, 1979.- 151 с.
- 2 Зубрилов С.П., Селиверстов В.М., Браславский М.И. Ультразвуковая кавитационная обработка топлива на судах. - Л.: Судостроение. 1988 – 80 с.
3. Зуев В.П., Кражкова Г.И. Влияние ультразвука на качество дизельного топлива // Труды Ленинградского сельскохозяйственного института. -Л.: 1978. № 345, с. 50-52.
- 4 Патент РФ 2057964 Устройство для кавитационной обработки жидкости / Браславский М.И. - № 5059993/06. Заявл. 8.9.92. Опубл. 10. Бюл. № 10 – 2 с.
- 5 Weissler F., Pecht I., Anbar M. Science 150, 1288, 1965, p. 74-97
- 6 Патент РФ № 2087518. Способ переработки жидкого углеводородного сырья и устройство для его осуществления. Юр Г.С. № 93047432/04 Заявл. 11.10.93. Опубл. 20.08.98. Бюл. № 23. -3 с.
- 7 Юр Г.С. Волновые процессы в судовых дизельных энергетических установках. - Новосибирск 1999.- 109 с.
- 8 Каптерев С.В., Пословина Л.П., Юр Г.С., Степанов В.Г., Ионе К.Г. Получение низших олефинов низкотемпературным пиролизом углеводородного сырья. // Материалы IV Международной конференции «Химия нефти и газа». Томск. «СТТ». 2000 г. т.2, с. 294-297.
- 9 Перник А.Д. Проблемы кавитации. - Л.: Судостроение. 1966. – 439 с.