

УДК 621.928, 51.72, 53.072.12

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГАЗОВОЙ КАВИТАЦИИ В ВИХРЕВЫХ УСТРОЙСТВАХ

В.И. Бажанов, М.В. Марченков, А.В. Рябухин

На примере модельной задачи – движения воды в цилиндре с вращающимися лопастями – рассмотрено явление возникновения газовой кавитации (выделения из воды растворенного в ней воздуха). Задача решена методом расщепления. С помощью пакета прикладных программ STAR-CCM+ решены система уравнений Навье – Стокса и уравнение неразрывности, получено поле скоростей для жидкости. Методами Кранка – Николсона и верхней релаксации (SOR) решено уравнение диффузии для растворенного в воде воздуха. Обнаружено вихревое движение жидкости в цилиндре, которое приводит к увеличению объемной доли растворенного в воде воздуха в области, близкой к центру вихря. Установлено, что объемная доля растворенного воздуха оказывается больше допустимой, определяемой законом Генри, поэтому его избыток будет выделяться в виде газа, в результате чего и возникает газовая кавитация.

Ключевые слова: газовая кавитация, вихревое движение жидкости.

Введение

Газовой кавитацией называют явление разрыва капельной жидкости, при котором образуются полости – кавитационные пузырьки, заполненные газом, содержащимся в жидкости [1]. Кавитация может быть использована для дегазации нефти с целью ее подготовки к дальнейшему транспорту и переработке. В вихревых аппаратах (рис. 1) при возникновении газовой кавитации из нефти начинает выделяться растворенный в ней газ [2].

Существует много работ, посвященных фазовому разделению потоков в двухфазной системе и выделению газа из системы (например, [3, 4]). Однако причины возникновения двухфазной системы (возникновения газовой кавитации) – выделения из жидкости растворенного в ней газа – до настоящего времени не ясны.

Модельная задача

Рассмотрим явление возникновения газовой кавитации на простейшем модельном примере.

Экспериментальная установка представляет собой цилиндр радиусом $R=15$ см, высотой $h=10$ см с четырьмя радиальными лопастями прямоугольного сечения (ширина лопасти 0,5 см), прикрепленными к стержню радиусом 3,5 см. В цилиндре находится вода с растворенным в ней воздухом. В начальный момент времени лопасти мгновенно начинают вращаться с частотой ω , равной 1900 об/мин. При этом наблюдается диффузия газа, растворенного в жидкости.

Цель задачи – определение изменения концентрации газа в жидкости. Будем решать эту задачу методом расщепления [5]. Сначала, пренебрегая диффузией воздуха, рассчитаем поле скоростей воды, а затем для стационарного поля скоростей воды – диффузию газа.

Уравнения, описывающие нестационарное течение вязкой несжимаемой жидкости (система уравнений Навье – Стокса), и уравнение неразрывности в цилиндрической системе координат (r, φ, z) записываются следующим образом [6]:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} - \frac{v^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\eta}{\rho} \left(\nabla^2 u - \frac{u}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right); \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} - \frac{uv}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \frac{\eta}{\rho} \left(\nabla^2 v + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \varphi} - \frac{v}{r^2} \right); \\ \frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \varphi} = 0; \end{cases}$$

$$\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} = 0, \quad (1)$$

где u , v – радиальная и тангенциальная составляющие скорости движения точки жидкости; p – давление жидкости; η – динамическая вязкость жидкости; ρ – плотность жидкости.

Неизвестными являются величины u , v , p . Граничными условиями являются условия прилипания на лопастях и непротекания на стенках цилиндра.

Используя пакет прикладных программ STAR-CCM+ компании CD-adapco, решаем систему уравнений Навье – Стокса и уравнение неразрывности и находим векторное поле скоростей (рис. 2).

Рассмотрим диффузию воздуха в жидкости, поле скоростей которой уже рассчитали. Будем считать, что воздух состоит из 78 % азота и 22 % кислорода. Зная растворимость каждого из этих газов [7], примем для воздуха среднюю растворимость в воде, соответствующую объемной доле воздуха в воде, равной 0,019. Разницей в массах молекул кислорода и азота пренебрегаем и берем их среднюю массу. Запишем уравнение диффузии [8] в цилиндрической системе координат, считая, что решение не зависит от осевой координаты z :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial r} + v \frac{\partial c}{\partial \varphi} = D \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 c}{\partial \varphi^2} \right], \quad (2)$$

где c – объемная доля газа в жидкости; D – коэффициент диффузии газа.

В начальный момент времени концентрация газа в жидкости во всех точках системы постоянна и равна его растворимости. Граничные условия: производная по нормали для концентрации газа в жидкости, находящейся на стенках цилиндра и лопастях, равна нулю.

Результаты расчетов

Зададим время $\tau = 1$ с и шаг по времени, равный 0,01 с. Для $\tau = 0$ выбираем начальное условие: $c(0, r, \varphi) = c_0 = 0,019$ во всех точках

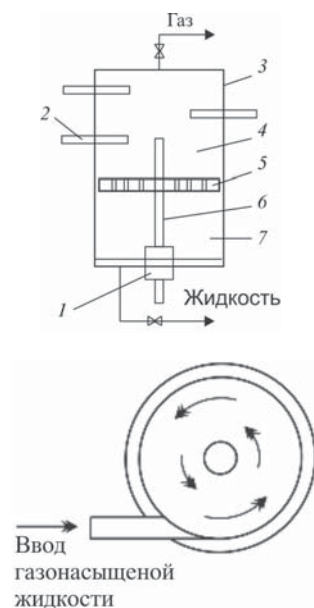


Рис. 1. Принципиальная схема вихревой камеры (диаметр камеры 60 мм, высота 110 мм):

1 – сальниковое уплотнение; 2 – сопловой ввод; 3 – корпус; 4 – рабочая полость; 5 – перфорированная шайба; 6 – винтовой шток; 7 – бункерное пространство

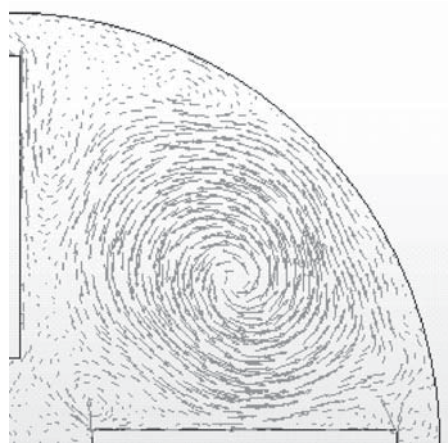


Рис. 2. Векторное поле скоростей

системы. Рассчитаем методами Кранка – Николсона и SOR [9] объемную долю воздуха в жидкости $c(t, r, \varphi)$ через 1 с после начала диффузии (рис. 3).

Сравнение рис. 2 и 3 показывает, что вследствие вихревого движения жидкости объемная доля растворенного газа увеличивается в области, близкой к центру вихря.

Объемную долю газа в растворе жидкости и газа можно определить по закону Генри, согласно которому при постоянной температуре растворимость данного газа в данном раствори-

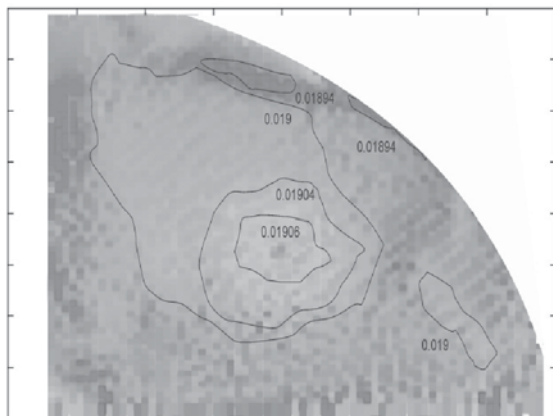


Рис. 3. Объемная доля воздуха в жидкости при $\tau = 1$ с

теле прямо пропорциональна давлению этого газа над раствором [10]. Если концентрация газа в некоторой части раствора превышает допустимую, то газ выделяется из него.

Из рис. 3 видно, что в определенной области объемная доля воздуха превышает допустимую, и, следовательно, воздух будет выделяться в виде газа. Объем выделившегося газа $V_{в.г}$ определим по формуле

$$V_{в.г} = V \iint [c(1, r, \varphi) - c_0] r^2 dr d\varphi, \quad (3)$$

где $V = \pi r^2 h$ – общий объем раствора.

Рассчитанный объем газа, выделившегося в течение 1-й секунды с начала вращения лопастей, составляет 0,75 см³. Выделяющийся газ собирается в пузырьки, что и является свидетельством об образовании газовой кавитации. Таким образом, возникновение газовой кавитации обусловлено вихревым движением жидкости и увеличением в центре вихря объемной доли растворенного в воде воздуха до уровня выше допустимого.

Оценим теперь время, необходимое для выделения всего газа из жидкости. Выберем новое начальное условие:

$$c_1(r, \varphi) = \begin{cases} c(1, r, \varphi), & \text{если } c(1, r, \varphi) < c_0; \\ c_0, & \text{если } c(1, r, \varphi) \geq c_0. \end{cases} \quad (4)$$

Рассчитаем методами Кранка – Николсона и SOR объемную долю газа $c(2, r, \varphi)$. Определим объем газа, выделившегося на 2-й секунде с начала вращения лопастей, по формуле

$$V_{в.г} = V \iint [c(2, r, \varphi) - c_1(r, \varphi)] r^2 dr d\varphi. \quad (5)$$

Аналогичным образом рассчитаем объем газа, выделившегося на 3-й, 4-й и последую-

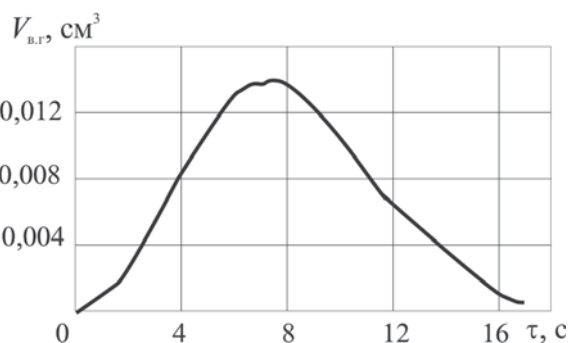
щих секундах с начала вращения лопастей. На каждом шаге нормирование объемной доли газа проводится по формуле

$$c(\tau, r, \varphi) = \frac{c'(\tau, r, \varphi) S c_0}{\iint_S c'(\tau, r, \varphi) r^2 dr d\varphi},$$

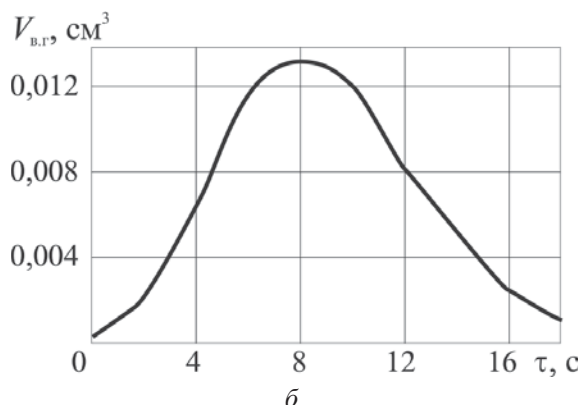
где $c'(\tau, r, \varphi)$ – функция, полученная в результате расчета; $c_0 = 0,019$; S – площадь сектора с углом 90°, показанного на рис. 3.

График изменения объема выделившегося газа при различных коэффициентах диффузии в момент времени τ приведен на рис. 4, а, б. Из рис. 4 видно, что изменение коэффициента диффузии несущественно влияет на эффективность образования газа, т.е. перенос газа определяется в основном конвекцией. Аналогичная задача была решена при $w = 12\,000$ об/мин и определено время выделения газа из жидкости при различных коэффициентах диффузии и частотах вращения лопастей цилиндра. Результаты расчетов приведены в таблице.

Следует отметить, что время выделения газа из раствора определяется с низкой точностью, так как расчет проводится без учета превращения однофазной системы в двухфазную после возникновения кавитации. Однако результаты



а



б

Рис. 4. Изменение объема выделившегося газа во времени:
а – при $D = 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$; б – при $D = 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$

Время выделения газа из раствора при различных коэффициентах
диффузии и частотах вращения лопастей цилиндра

Частота вращения лопастей, об/мин	Коэффициент диффузии D , см ² /с	Время дегазации, с
12 000	10^{-5}	12
	10^{-6}	16
	10^{-7}	18
1 900	10^{-5}	18
	10^{-6}	19
	10^{-7}	20

даже такого расчета, не учитывающего также и времени превращения двухфазной системы в однофазную, не противоречат экспериментальным данным, приведенным в работе [4], когда время дегазации составляло 10 с. Отсюда можно сделать вывод о том, что погрешность предлагаемого расчетного метода не превышает 30 %.

Заключение

На модельном расчете показано, что в результате вихревого движения жидкости в центре вихря объемная доля растворенного в воде воздуха увеличивается. При этом она может превышать объемную долю воздуха, соответствующую растворимости, – максимально допустимую объемную долю воздуха в воде, и тогда избыток воздуха будет выделяться в виде газа. Это явление и приводит к возникновению газовой кавитации.

Список литературы

1. Рождественский В.В. Кавитация. – Л.: Судостроение, 1977. – 248 с.
2. Бахмат Г.В., Пахаруков Ю.В., Кабес Е.Н. Разделение газожидкостных смесей в вихревых аппаратах. – Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2007. – 203 с.

3. Пахаруков Ю.В., Бахмат Г.В. Физико-математическое моделирование разделения многофазных систем // Вестник ТюмГУ. 2009. № 6. С. 83.
4. Бахмат Г.В., Корнеева Н.С., Пахаруков Ю.В. Расчеты интенсивности газовыделения при выходе системы «жидкость – газ» из области неустойчивости // Вестник ТюмГУ. 2011. № 7. С. 59.
5. Марчук Г.И. Методы расщепления. – М.: Наука, 1988. – 264 с.
6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
7. Никольский Б.П. Справочник химика. Т. 1. – Л.: Химия, 1966. – 1072 с.
8. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959. – 700 с.
9. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 61 с.
10. Киреев В.А. Курс физической химии. – М.: Химия, 1975. – 775 с.

Материал поступил в редакцию 31.03.2012

**БАЖАНОВ
Виталий Идельевич**

E-mail: bazhanov@mail.msiu.ru
Тел.: (495) 620-39-55

Доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники, теплотехники, гидравлики и энергетических машин ФГБОУ ВПО «МГИУ». Сфера научных интересов – компьютерное моделирование, физическая химия, физико-химическая гидродинамика. Автор более 70 научных и научно-методических трудов.

**МАРЧЕНКОВ
Максим Васильевич**

Студент ФГБОУ ВПО «МГИУ». Сфера научных интересов – вычислительная математика, программирование.

**РЯБУХИН
Александр Вадимович**

Аспирант ФГБОУ ВПО «МГИУ». Сфера научных интересов – гидравлические машины и гидропневмоагрегаты, компьютерное моделирование. Автор одной публикации.