

Моделирование процесса формирования кавитационных пузырей в осевых клапанах

А.Е. Лебедев, А.А. Ватагин, И.С. Гуданов, Д.С. Долгин, И.П. Королев

Ярославский государственный технический университет

Аннотация: В статье рассматривается процесс формирования кавитационных пузырей в регулирующей арматуре. Одной из эффективных её конструкций является клапан осевого типа, для которого разработано математическое описание процесса формирования кавитационных пузырей. Это описание позволяет оценить структуру пузырей в зависимости от основных режимных и конструктивных параметров клапана.

Ключевые слова: осевой регулирующий клапан, запирающее устройство, кавитация, кавитационные пузыри, математическое моделирование, вероятностный подход.

С целью снижения негативного воздействия кавитации на элементы клапана и трубопровода были разработаны новые конструкции регулирующих клапанов прямого типа, позволяющие снизить кавитационные эффекты, возникающие при их работе, а также уменьшить длину клапана и повысить его быстродействие. Возникновению кавитации способствуют перепады давления, изменения направления жидкости, а также турбулентные течения, возникающие при движении жидкости во внутреннем объеме клапана [1].

Основой для моделирования процесса формирования кавитационных пузырей прием осевой регулирующей клапан с запирающим устройством поворотного типа [2, 3].

Многочисленные работы по кавитации в трубопроводной арматуре посвящены выявлению режимов ее возникновения, изучению механизмов разрушения деталей клапанов, а также процессам формирования шумов и вибраций [4-10]. Однако практически всеми авторами исследований кавитации указывается влияние размеров кавитационных пузырей на интенсивность кавитационного разрушения, а количественная оценка размеров пузырей и других характеристик процесса кавитации представлена весьма фрагментарно [11-13].

В данной работе для изучения кавитации в клапанах было разработано математическое описание процесса формирования кавитационных пузырей в новых конструкциях клапанов, основывающееся на вероятностном подходе.

В процессе истечения жидкости сквозь отверстия в сепараторе образуются расширяющиеся струи, направленные к оси клапана. При взаимодействии струй с жидкостью, находящейся внутри выпускного отсека клапана, ввиду возрастания давления имеет место возникновение кавитации.

Ввиду того, что образование кавитационных пузырей носит случайный характер строгое аналитическое решение данной задачи получить невозможно. По этой причине при математическом описании будем использовать вероятностный подход, позволяющий получить сведения о распределении кавитационных пузырей по размерам, значения их среднего диаметра и других характеристик.

Согласно данному подходу, распределение числа кавитационных пузырей dN в элементе фазового объема, который в данном случае описывается выражением $d\Gamma = vdvD$. В формуле v – случайная скорость кавитационного пузыря, а D – случайный диаметр пузыря. Фазовый объем $d\Gamma$, экспоненциально убывает в зависимости от стохастической энергии E , имеющей в данном случае две составляющие – кинетическую и поверхностную энергии:

$$dN = A \cdot \exp\left(\frac{-E}{E_0}\right) d\Gamma, \quad (1)$$

где E_0 – энергетическая константа, A – нормировочная постоянная, E – стохастическая энергия движения кавитационных пузырей:

$$E = \frac{mv^2}{2} + \pi D^2 \sigma, \quad (2)$$

где m – масса кавитационного пузыря, σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Основным допущением модели является сферическая форма кавитационных пузырей.

С целью упрощения дальнейших вычислений перейдем от независимых параметров модели D и v к безразмерным величинам, определяемым по формулам:

$$Д = \frac{D}{D_0}, \quad W = \frac{v}{v_0}. \quad (3)$$

В формуле (3) D_0 и v_0 – максимальный размер отверстий во внутреннем сепараторе и средняя скорость движения жидкости на входе в клапан соответственно. Тогда выражение для энергии стохастического движения с учетом введенных безразмерных параметров примет вид:

$$E = \frac{\rho\pi Д^3 D_0^3 W^2 v_0^2}{12} + \pi\sigma(ДD_0)^2. \quad (4)$$

В выражении (5) ρ – плотность газа (пара) в кавитационном пузыре; W – безразмерная скорость, $Д$ – безразмерный диаметр кавитационного пузыря;

Тогда согласно исследованию [6-8] при $d\Gamma' = dv$ (сокращенный элемент фазового объема) получим выражение для дифференциальной функции распределения количества кавитационных пузырей по безразмерному диаметру $f(Д)$:

$$f(Д) = AN^{-1}(j_1 - j_2), \quad (5)$$

где величины j_1 , и j_2 , определяются по формулам:

$$j_1 = \sqrt{3}erf(j_3 w_{max})j_4 j_5^{-1}, \quad j_2 = \sqrt{3}erf(j_3 w_{min})j_4 j_5^{-1}, \quad (6)$$

где w_{max}, w_{min} – максимальное и минимальное значение безразмерной скорости; erf – функция ошибок.

Представленные формулы и результаты дальнейших вычислений были получены при помощи системы символьных вычислений *wxMaxima*.

Следующим этапом математического описания является нахождение параметров дифференциальной функции распределения (5).

Энергетическая константа E_0 , соответствующая мере энергии системы кавитационных пузырей в выражении (1), определяется из уравнения энергетического баланса в момент начала образования пузырей:

$$E_{p1} = E_{p2}, \quad (7)$$

где E_{p1} – энергия потока с пузырями, E_{p2} – энергии струй жидкости, втекающих в отверстия сепаратора соответственно:

$$E_{p1} = \int_{\Gamma} E dN. \quad (8)$$

Значение скорости жидкости при расчете E_{p2} может быть найдено с использованием результатов моделирования течения жидкости сквозь клапан. В связи с громоздкостью аналитического выражения для E_0 , в работе оно не представлено. Незвестный параметр A (нормировочная постоянная) в формуле (1) можно найти из условия нормировки:

$$N = \int_{\Gamma} dN. \quad (9)$$

Аналитическое выражение для нормировочной константы:

$$A = \frac{g_1}{g_2(g_3 + g_4)}, \quad (10)$$

Величины $g_1 - g_4$, входящие в выражение (10) находятся:

$$g_1 = -D_0^{1,5} N v_0 \sqrt{\rho} \exp(\pi D_0^2 \sigma E_0^{-1});$$

$$g_2 = \sqrt{3}(D_{min}^2 - 2D_{max}D_{min} + D_{max}^2)\sqrt{E_0} \quad (11)$$

$$g_3 = erf\left(\sqrt{\pi}D_0v_0w_{min}\sqrt{D_0\rho E_0^{-1}}\right), g_4 = erf\left(\sqrt{\pi}D_0v_0w_{max}\sqrt{D_0\rho E_0^{-1}}\right)$$

где D_{max} , D_{min} – максимальное и минимальное значение безразмерного диаметра.

Средний диаметр кавитационных пузырей, являющийся важнейшей характеристикой образованного потока кавитационных пузырей, может быть найден по формуле:

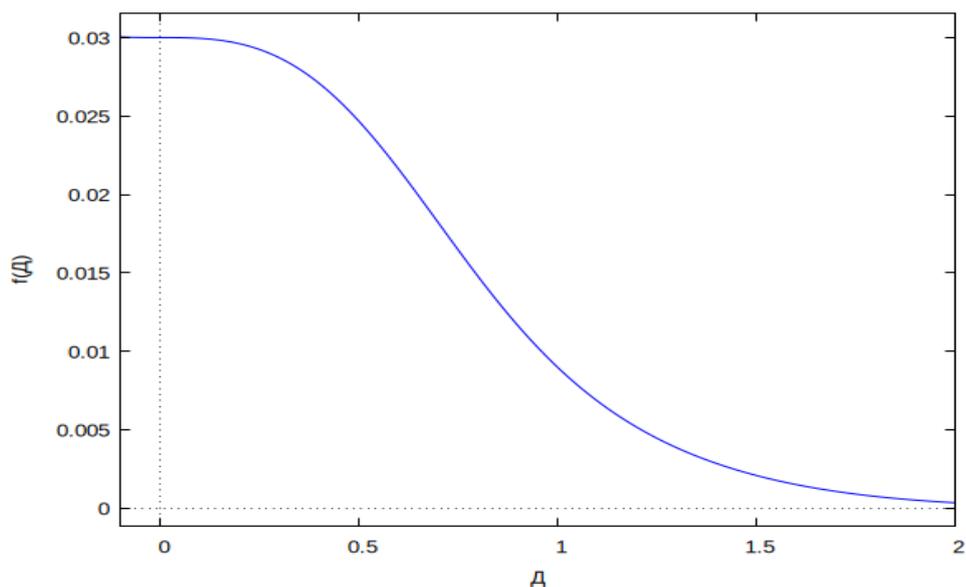
$$D_{cp} = \frac{h \cdot (g_4 - g_3) \exp(-\pi D_0^2 \sigma E_0^{-1})}{D_0^{3/2} v_0 \sqrt{\rho}}, \quad (12)$$

где h – коэффициент, определяемый из выражения:

$$h = \sqrt{3} A (D_{max} - D_{min}) \left(\frac{D_{max}^2}{2} - \frac{D_{min}^2}{2} \right) \sqrt{E_0}. \quad (13)$$

На рис. 1 показан вид дифференциальной функции распределения числа кавитационных пузырей (выражения (5) и (6)) по безразмерному параметру D . Представленная теоретическая кривая имеет максимальное значение в начале координат. Однако данное значение $f(0)$ не имеет физического смысла.

По этой причине представим теоретическую кривую в виде двух участков. На первом участке (основном) будем ограничивать область применения теоретической кривой значениями безразмерной величины $D > 0,1$. При меньших значениях D распределение числа кавитационных пузырей будем описывать линейной зависимостью от 0 до $f(D)=0,01$ (рис. 2).



$$A = 3 \cdot 10^2, E_0 = 231 \text{ Дж},$$

Рис. 1 – Дифференциальная функция распределения числа кавитационных пузырей по параметру D

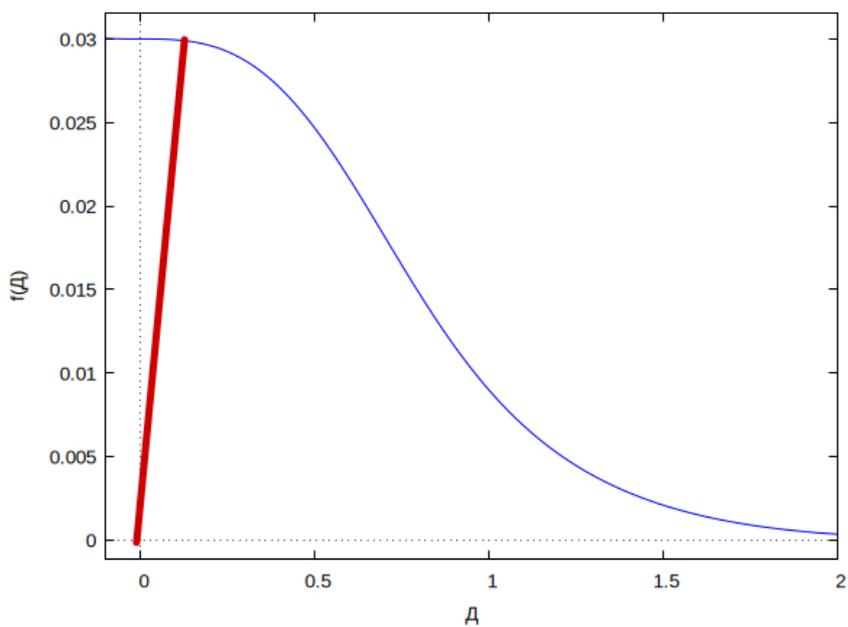


Рис. 2 – Кусочное представление $f(D)$

Зависимости среднего значения безразмерной величины $D_{\text{ср}}$ от безразмерной скорости показана на рис. 3.

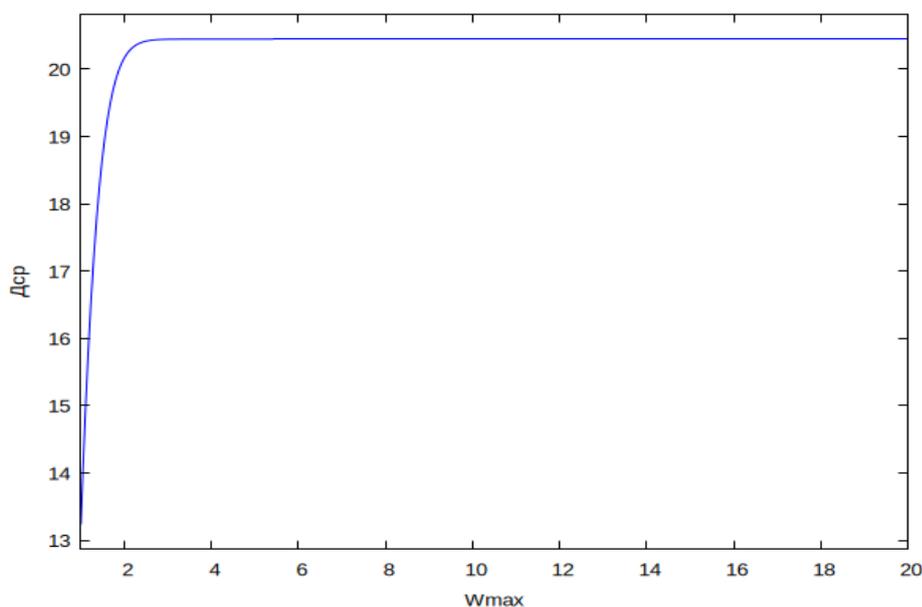


Рис. 3 – Зависимость D_{cp} от W_{max}

С ростом величины безразмерной скорости W_{max} сначала наблюдается резкое увеличение значения среднего диаметра D_{cp} , что объясняется снижением давления при истечении жидкости из отверстий в сепараторе, приводящим к более интенсивному образованию пузырей, при котором возрастает их количество и размеры. Далее быстрота увеличения D_{cp} уменьшается, а затем прекращается. Это объясняется тем, что зона возникновения кавитационных пузырей имеет ограниченные размеры (внутри делителей потоков), препятствующие неограниченному распространению кавитационных пузырей. Кроме того, на образование кавитационных пузырей сказывается влияние давления в выходной части клапана (противодавление).

Зависимость D_{cp} от плотности среды представлена на рис. 4. С повышением плотности дросселируемой жидкости наблюдается снижение размеров кавитационных пузырей.

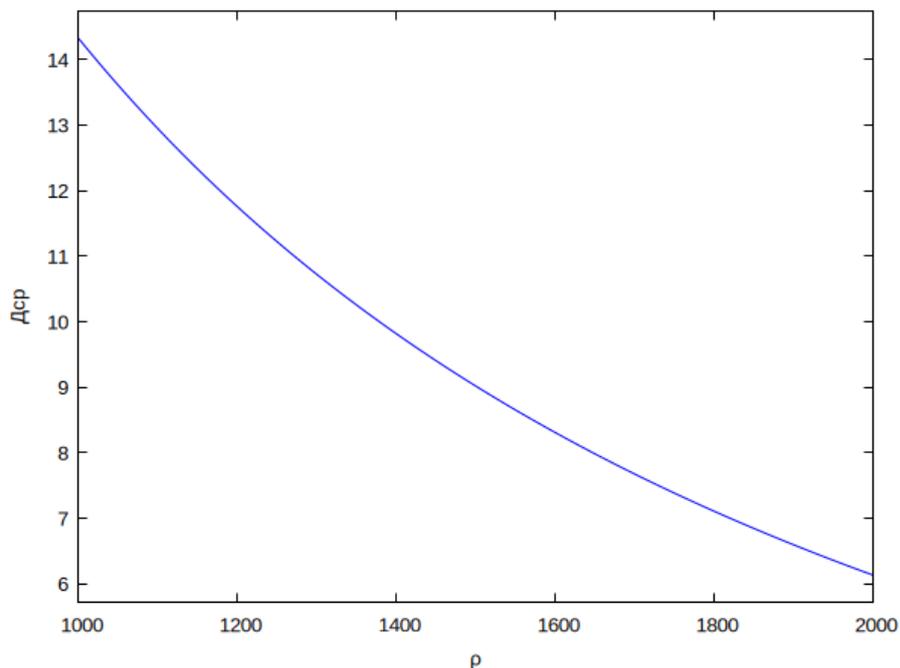


Рис. 4 – Зависимость D_{cp} от плотности жидкости (кг/м³)

Полученные выражения для дифференциальной функции распределения числа пузырей по размерам позволят оценить структуру кавитационных пузырей в зависимости от основных режимных и конструктивных параметров клапана вышеописанной конструкции.

Литература

1. Stephenson D. Pipeline design for water engineers. – Third revised and updated edition. – Amsterdam : ELSEVIER Science Publishers B.V., 1989. – 263 p.
2. Лебедев А.Е., Капранова А.Б., Ватагин А.А., Гуданов И.С., Долгин Д.С. Разработка осевого регулирующего клапана с поворотным запорным органом // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 12. С. 80-83.
3. Капранова А.Б., Солопов С.А., Мельцер А.М. К вопросу о проектировании регулирующих клапанов // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3069.

4. Арзуманов З.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. – М. : Энергия, 1978. – 303 с.
 5. Кулагин В.А., Соколов Н.Ю. Кавитация в элементах запорной арматуры трубопроводных систем // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. Область: Физика. 2014. № 7. С. 872-880.
 6. Константинов С.Ю., Целищев Д.В. Исследование и совершенствование численных моделей кавитационного массопереноса // Вестник УГАТУ. 2013. № 3. С. 123-129.
 7. Прохасько Л.С. Гидродинамика и расчет кавитационных смесителей непрерывного действия: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.13 / Прохасько Любовь Савельева. – Пермь, 2000. – 20 с.
 8. Неклюдов С.В. Процесс гидродинамической кавитации при осесимметричном дросселировании потоков жидкости : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Неклюдов Сергей Владимирович. – Иваново, 2018. – 20 с.
 9. Капранова А.Б., Лебедев А.Е., Мельцер А.М., Солопов С.А., Неклюдов С.В. О методах расчета гидравлических сопротивлений регулирующих органов при транспортировании однокомпонентных сред // Фундаментальные исследования. 2016. № 4. С. 52-60.
 10. Долгин Д.С., Лебедев А.Е., Гуданов И.С. Математическая модель формирования кавитационных пузырей в центробежных насосах // Инженерный вестник Дона. 2019. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5807.
 11. Витенько Т.Н., Гумницкий Я.М. Механизм активирующего действия гидродинамической кавитации на воду // Химия и технология воды. 2007. Т. 29. № 5. С. 422-432.
 12. Кулагин В.А. Суперкавитация в энергетике и гидротехнике. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2000. – 107 с.
-

13. Ni L.-X., Chen Z.-S., Liu Z., Feng X.-F. Hydrodynamic analysis of ultra-high pressure water derusting nozzle // Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. 2020. P. 1842-1850.

References

1. Stephenson D. Pipeline design for water engineers. Third revised and updated edition. Amsterdam: ELSEVIER Science Publishers B.V., 1989. 263 p.
 2. Lebedev A.E., Kapranova A.B., Vatagin A.A., Gudanov I.S., Dolgin D.S. Nauchno-texnicheskij vestnik Povolzh`ya. 2023. № 12. pp. 80-83.
 3. Kapranova A.B., Solopov S.A., Mel`cer A.M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2015. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3069.
 4. Arzumanov Z.S. Kavitatsiya v mestny`x gidravlicheskih soprotivleniyax [Cavitation in local hydraulic resistances]. M. : E`nergiya, 1978. 303 p.
 5. Kulagin V.A., Sokolov N.Yu. Zhurnal Sibirskogo federal`nogo universiteta. Texnika i texnologii. Oblast`: Fizika. 2014. № 7. pp. 872-880.
 6. Konstantinov S.Yu., Celishhev D.V. Vestnik UGATU. 2013. № 3. pp. 123-129.
 7. Proxas`ko L.S. Gidrodinamika i raschet kavitacionny`x smesitelej neprery`vnogo dejstviya [Hydrodynamics and calculation of continuous cavitation mixers]: avtoref. dis. ... kand. texn. nauk : 05.04.13. Proxas`ko Lyubov` Savel`eva. – Perm`, 2000. 20 p.
 8. Neklyudov S.V. Process gidrodinamicheskoy kavitatsii pri osesimmetrichnom drosselirovanii potokov zhidkosti [The process of hydrodynamic cavitation with axisymmetric throttling of liquid flows]: avtoref. dis. ... kand. texn. nauk : 05.17.08 / Neklyudov Sergej Vladimirovich. Ivanovo, 2018. 20 p.
 9. Kapranova A.B., Lebedev A.E., Mel`cer A.M., Solopov S.A., Neklyudov S.V. Fundamental`ny`e issledovaniya. 2016. № 4. pp. 52-60.
-



10. Dolgin D.S., Lebedev A.E., Gudanov I.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5807.

11. Viten`ko T.N., Gumniczkiy Ya.M. Ximiya i texnologiya vody`. 2007. Т. 29. № 5. S. 422-432.

12. Kulagin V.A. Superkavitaciya v e`nergetike i gidrotexnike [Supercavitation in energy and hydraulic engineering]. Krasnoyarsk: IPCz KGTU, 2000. 107 p.

13. Ni L.X., Chen Z.S., Liu Z., Feng X.F. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. 2020. pp. 1842-1850.

Дата поступления: 24.02.2025

Дата публикации: 25.04 2025