

Экспериментальное исследование формирования кавитационных пузырей в осевых клапанах

А.А. Ватагин, А.Е. Лебедев, И.С. Гуданов, Д.С. Долгин, А.В. Оборин

Ярославский государственный технический университет

Аннотация: Авторами статьи приводится экспериментальное исследование, на лабораторной установке, образования кавитационных пузырей в осевых клапанах с делителями потоков. Исследование проводилось для подтверждения ранее описанной математической модели. Детально произведено описание образования кавитационных пузырьков разного размера, оказывающих негативное воздействие на запорную и регулируемую арматуру.

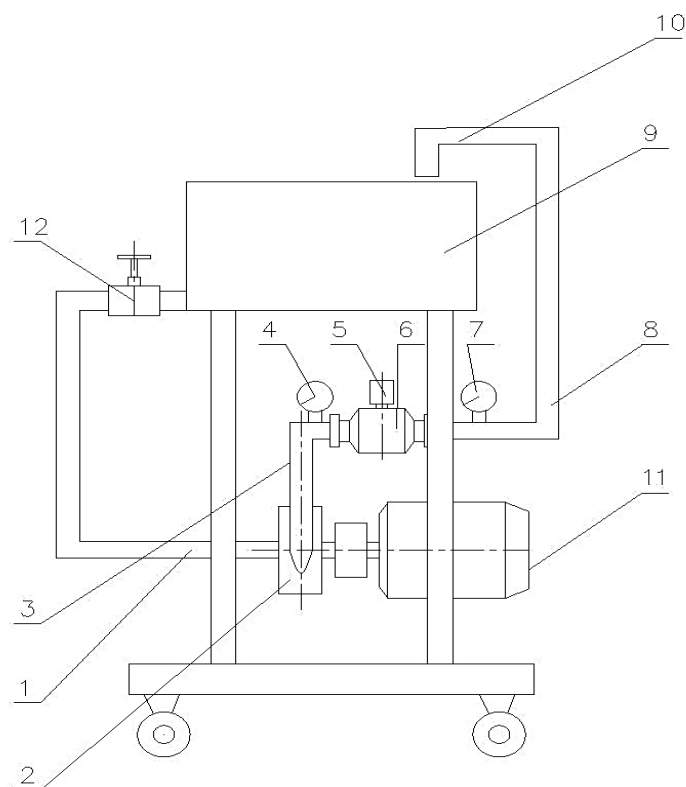
Ключевые слова: кавитационные пузыри, эксперимент, осевой клапан, запирающее устройство, делитель потока, размер, кавитация, вероятностный подход.

Кавитация представляет собой одну из ключевых проблем, возникающих в разных элементах машин и механизмов, таких, как насосы [1, 2] или запорная арматура [3, 4]. Для минимизации воздействия кавитации, одним из наиболее результативных подходов является разделение потока жидкости на отдельные струи. Характеристики устройств, осуществляющих данное разделение, оказывают значительное воздействие на степень уменьшения кавитационных явлений. В рамках данного исследования была разработана вероятностная математическая модель, предназначенная для оценки размеров формирующихся кавитационных пузырьков. С целью подтверждения соответствия разработанной математической модели, представленной в исследовании [5], были проведены экспериментальные исследования процесса образования кавитационных пузырьков в моделях осевых клапанов. Сопоставление результатов также проводилось с данными, представленными в диссертации Неклюдова С.В., полученными на клапане аналогичной конструкции [6].

В рамках диссертационной работы [6] автор сосредоточился на изучении функционирования осевого регулирующего клапана, характеризующегося внешней компоновкой запирающего элемента. Для моделирования средних

габаритов кавитационных пузырей и закономерностей их размерного распределения был применен вероятностный метод, чья адекватность была подтверждена эмпирическим путем.

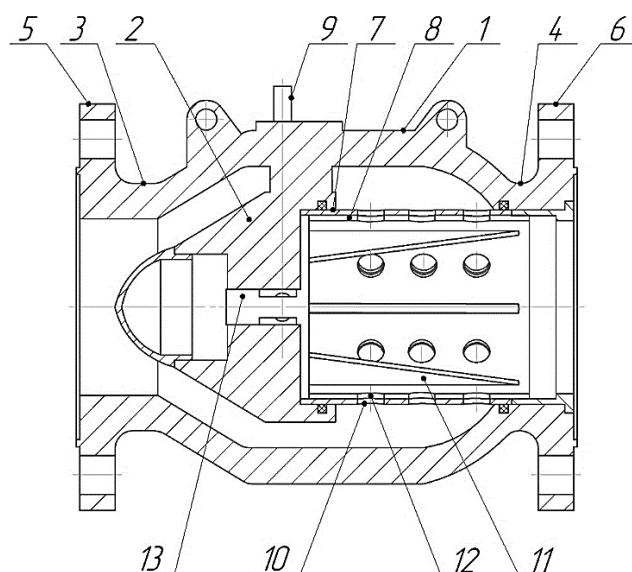
Результаты проведенных опытов позволили установить характеристики распределения кавитационных пузырей в зависимости от их размера. Экспериментальная часть работы осуществлялась на специализированной лабораторной установке (рисунок 1) с применением конструкции осевого регулирующего клапана (рисунок 2) [7].



- 1 – входной патрубок, 2 – насос, 3 – напорный патрубок, 4 – манометр,
5 – регулирующее приспособление, 6 – клапан, 7 – манометр,
8 – трубопровод, 9 – емкость, 10 – сливной патрубок, 11 – электродвигатель,
12 – вентиль

Рис. 1 – Лабораторная установка

Лабораторная установка работает по следующему принципу. Рабочая жидкость, в данном исследовании – вода, из резервуара 9, расположенного в верхней секции устройства, с помощью центробежного насоса 2 направляется к входному отверстию 3 моделируемого клапана. Показатели давления жидкости, поступающей в клапан, регистрируются посредством манометра 4.



1 – внешний корпус, 2 – внутренний корпус, 3 – входной патрубок, 4 – выходной патрубок, 5,6 – фланцы патрубков, 7 – цилиндрический делитель потока, 8 – кольцевые ряды, 9 – вал привода, 10 – отверстия делителя потока, 11 – пластина, 12 – отверстия запирающего элемента (диаметр больше, чем в отверстиях 10), 13 – ступенчатый шток

Рис. 2 – Конструкция осевого регулирующего клапана

В ходе экспериментов применялась упрощенная версия регулирующего клапана. Вода, проходя через открытый клапан 6, подвергается дросселированию посредством делителей потока, выполненных в виде круглых отверстий, организованных в кольцеобразные ряды. Контроль

давления на выходе из клапана осуществляется с использованием манометра 7.

В ходе проведенного исследования были зафиксированы определенные результаты. На рисунке 3 представлено сопоставление эмпирических и теоретических данных, касающихся распределения кавитационных пузырей в зависимости от их величины.

В данном случае, эмпирические данные отображены точками, в то время как теоретические представлены непрерывной линией. [8, 9, 10].

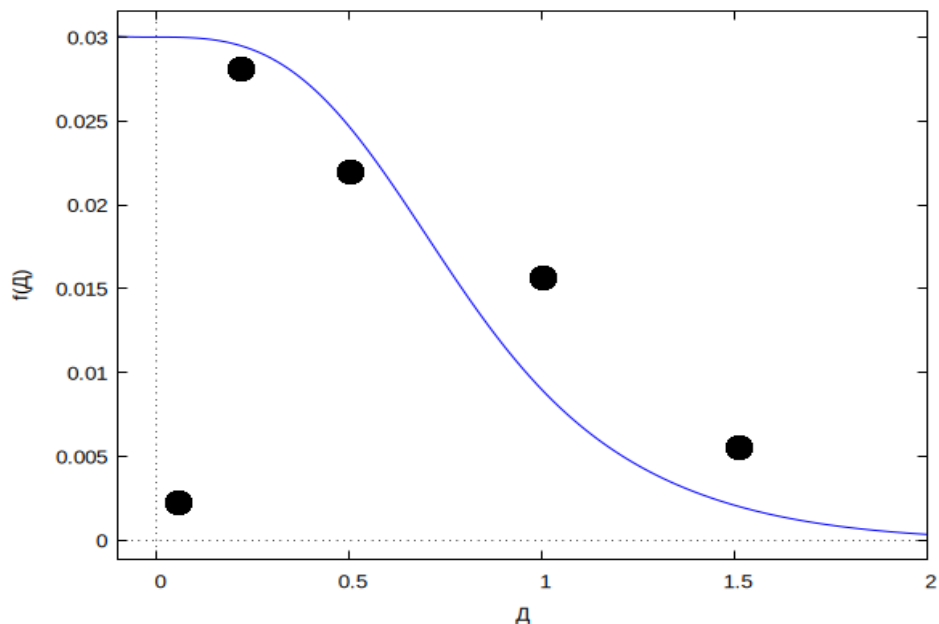


Рис. 3 – Сравнение экспериментальных и теоретических данных

Согласованность между эмпирическими и теоретическими результатами при малых значениях параметра «Д» соответствует гипотезе, представленной в работах [2, 5]. На остальном протяжении графика наблюдается приемлемое соответствие между теорией и практикой, что свидетельствует о достоверности предложенной математической модели.

Распределение количества кавитационных пузырьков по размерам представлено на рисунках 4-6.

На рисунке 4 представлены результаты для начальной фазы — процесса открытия клапанов. Клапан открыт на 20% от максимального значения. Регулировка степени открытия осуществлялась путем демонтажа клапана, изменения положения внутреннего распределителя потока относительно внешнего элемента, и последующей фиксации в выбранном положении.

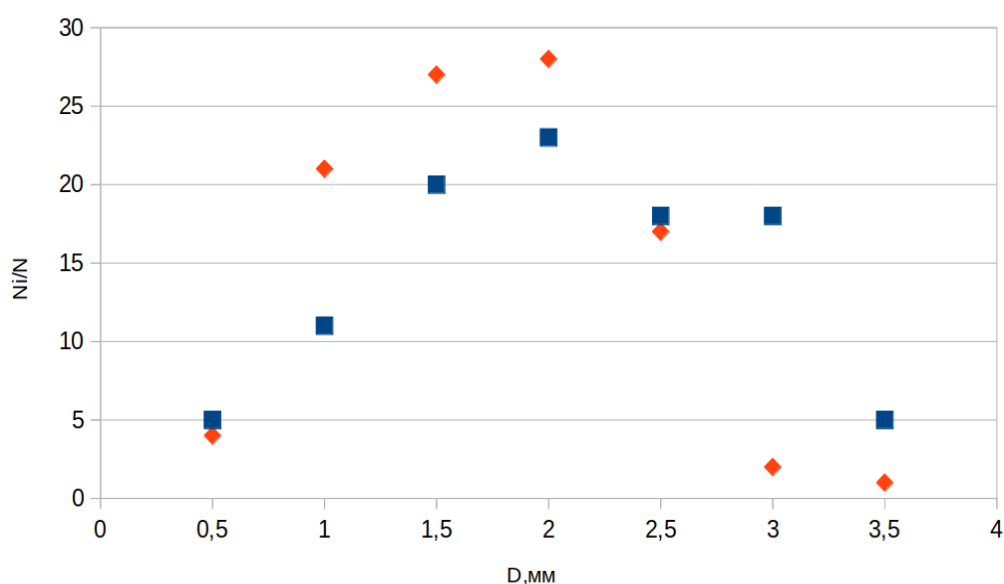


Рис. 4 – Распределение числа пузырьков по размерам (опытное) в начальной фазе открытия клапана

Здесь квадратные символы соответствуют клапану, описанному в работе [6], а ромбы – «короткоходному» клапану с поступательным перемещением запирающего органа, под отношением N_i/N понимается отношение числа кавитационных пузырей, имеющих определенный размер к общему числу кавитационных пузырей в данный момент времени.

На основе анализа представленной взаимосвязи можно заключить, что для обоих рассматриваемых типов клапанов наиболее распространены пузырьки с диаметром от 1 до 3 мм. Доля мелких пузырьков (в диапазоне от

0,5 до 1,5 мм) и крупных пузырьков (превышающих 3 мм) существенно ниже. Применительно к «короткоходному» клапану, отмечается значительное сокращение числа крупных пузырей, представляющих наибольшую опасность с точки зрения кавитационного износа.

На рисунке 5 изображено опытное распределение числа пузырьков по размерам при среднем положении запирающего органа (50% открытие). В рассматриваемой ситуации отмечается тенденция к росту кавитационных пузырьков, чей диаметр варьируется в диапазоне от 1 до 3 мм. Параллельно с этим, наблюдается уменьшение концентрации как мелких (размером до 1 мм), так и крупных (с диаметром 3 мм и более) пузырей. В случае применения клапана с уменьшенным ходом, количество крупных пузырей, как правило, снижается.

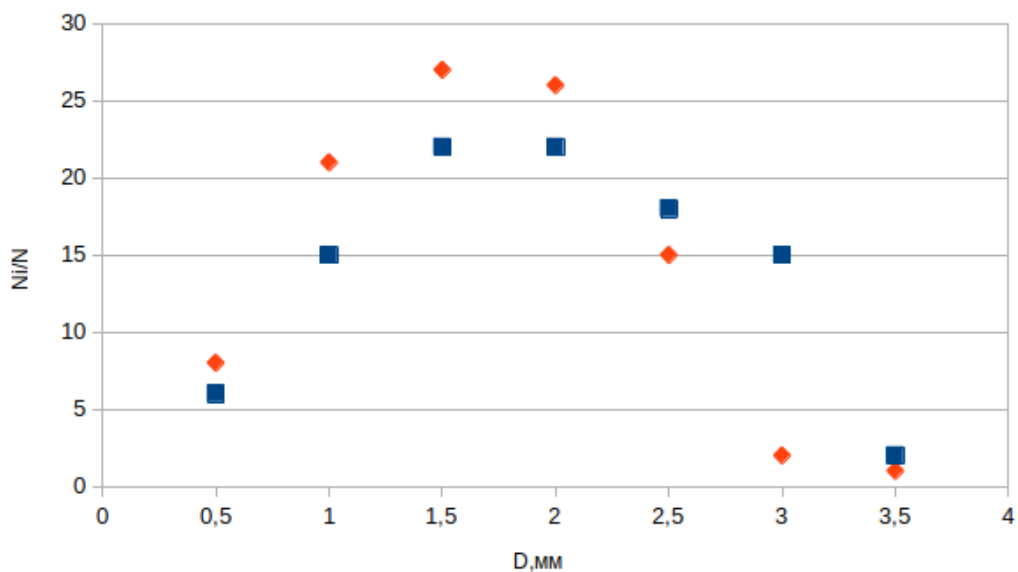


Рис. 5 – Опытное распределение числа пузырьков по размерам в промежуточном положении запорного органа

На рисунке 6 представлено аналогичное распределение, относящееся к завершающей стадии процесса, а именно полному открытию клапана. В

данном случае наблюдается тенденция к сглаживанию кривой, отображающей распределение пузырьков по их размерности, что характерно для клапана [5-7]. Примечательно, что в разрабатываемой конструкции клапана прирост числа пузырей крупного размера остается незначительным.

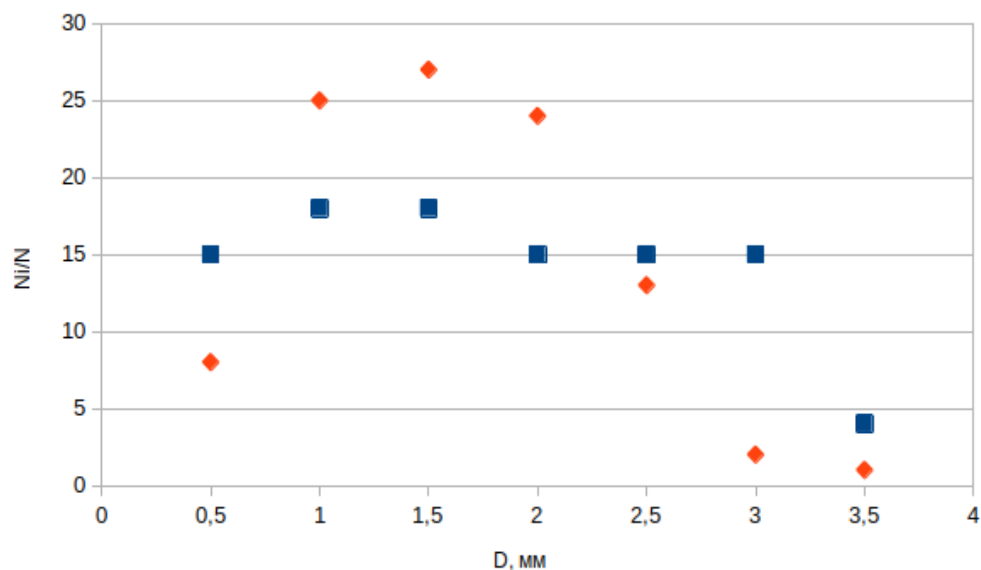


Рис. 6. – Распределение количества пузырьков по размерам при полностью открытом клапане

Анализ представленных графических зависимостей демонстрирует, что для клапана [5, 8], на начальном этапе открытия доминируют пузырьки с диаметром от 1 до 3 мм. При этом концентрация пузырьков малого размера (от 0,5 до 1,5 мм) и крупных пузырьков (свыше 3 мм) существенно ниже.

В процессе закрытия клапана отмечается снижение количества крупных пузырьков, сопровождающееся увеличением числа мелких пузырьков. В случае «короткоходного» клапана наблюдается значительное сокращение крупных пузырей, представляющих наибольшую опасность с точки зрения кавитации.

Литература

1. Ломакин В.О., Чадин В.А., Калинин Н.Г. Исследование влияния геометрической формы подводящего устройства на кавитационные качества лопастных насосов // Гидравлика. – 2020. – № 10. – С. 76-88.
2. 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.
3. Yang L., Zhenxing W., Zekai L., Lang C., Peihan Q., Jiegang M. Design of a novel pump cavitation valve and study of its cavitation characteristics // Water. – 2025. – Vol. 17, No. 10: 1503. URL: doi.org/10.3390/w17101503.
4. Majidov A.M. Control valves cavitation and its solution methods // Scientific News. Series for Natural and Technology Sciences. – 2023. – Vol. 23, No. 2. – pp. 94-99.
5. Лебедев А.Е., Ватагин А.А., Гуданов И.С., Долгин Д.С., Королев И.П. Моделирование процесса формирования кавитационных пузырей в осевых клапанах // Инженерный вестник Дона. 2025. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10077.
6. 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.
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. Лебедев А.Е., Шлыков К.С., Крутилов Д.А., Сажин А.В., Назимова Д.А., Дудко А.А., Изумрудов Л.С., Клушин Б.Д., Стогов И.А., Чубко И.И., Овчинников И.А., Белова И.Ф., Тупин Д.Н., Есин Е.А.,

Чаленко А.М. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет» ФГБОУВО «ЯГТУ». Регулирующий клапан. Патент. 2803152. Российская Федерация. МПК F16K 1/12, F16K 1/54, F16K 31/53. Номер заявки 2023104352. Дата подачи 22.02.2023. Дата публикации 07.09.2023. Бюл. №25.

9. 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.

10. Константинов С.Ю., Целищев Д.В. Исследование и совершенствование численных моделей кавитационного массопереноса // Вестник УГАТУ. 2013. № 3. С. 123-129.

References

1. Lomakin V.O., Chadin V.A., Kalin N.G. *Gidravlika*. 2020. № 10. pp. 76-88.
 2. Dolgin D.S., Lebedev A.E., Gudanov I.S. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2019. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5807.
 3. Yang L., Zhenxing W., Zekai L., Lang C., Peihan Q., Jiegang M. *Water*. 2025. Vol. 17, No. 10: 1503. URL: doi.org/10.3390/w17101503.
 4. Majidov A.M. *Scientific News. Series for Natural and Technology Sciences*. 2023. Vol. 23, No. 2. pp. 94-99.
 5. Lebedev A.E., Vatagin A.A., Gudanov I.S., Dolgin D.S., Korolev I.P. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2025. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10077.
 6. Neklyudov S.V. *Process gidrodinamicheskoy kavitacii pri osesimmetrichnom drosselirovanii potokov zhidkosti [The process of hydrodynamic cavitation during axisymmetric throttling of liquid flows]: avtoref. dis. ... kand. texn. nauk: 05.17.08 Neklyudov Sergej Vladimirovich. Ivanovo, 2018. 20 p.*
-



7. Proxas`ko L.S. Gidrodinamika i raschet kavitacionny`x smesitelej neprery`vnogo dejstviya [Hydrodynamics and Calculation of Continuous Cavitating Mixers]: avtoref. dis. ... kand. texn. nauk: 05.04.13 Proxas`ko Lyubov` Savel`eva. Perm`, 2000. 20 p.

8. Lebedev A.E., Shly`kov K.S., Krutilov D.A., Sazhin A.V., Nazimova D.A., Dudko A.A., Izumrudov L.S., Klushin B.D., Stogov I.A., Chubko I.I., Ovchinnikov I.A., Belova I.F., Tupin D.N., Esin E.A., Chalenko A.M. Federal`noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel`noe uchrezhdenie vy`sshego obrazovaniya «Yaroslavskij gosudarstvenny`j texnicheskij universitet» FGBOUVO «YaGTU». Reguliruyushhij klap. Patent. 2803152. MPK F16K 1/12, F16K 1/54, F16K 31/53. Nomer zayavki 2023104352. Data podachi 22.02.2023. Data publikacii 07.09.2023. Byul. №25.

9. Kulagin V.A., Sokolov N.Yu. Zhurnal Sibirskogo federal`nogo universiteta. Texnika i texnologii. Oblast`: Fizika. 2014. № 7. pp. 872-880.

10. Konstantinov S.Yu., Celishhev D.V. Vestnik UGATU. 2013. № 3. pp. 123-129.

Дата поступления: 1.06.2025

Дата публикации: 25.08.2025