

Изучение влияния размеров отверстий делителей потока осесимметричных регулирующих клапанов на гидродинамику потока

А.Е. Лебедев¹, А.А. Ватагин¹, И.С. Гуданов¹, Д.С. Долгин¹,

А.И. Холодкова²

¹Ярославский государственный технический университет, Ярославль

²Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны имени Маршала Советского Союза Л.А. Говорова, Ярославль

Аннотация: Авторами статьи проведено численное моделирование делителей потока (сепаратора) с различными диаметрами отверстий с целью предотвращения кавитационного разрушения. Диаметры отверстий, количество и ряды в сепараторах имеют эквивалентное значение, так как они определяют распределение локальных скоростей и давлений в потоке, минимизируя риск образования паровых пузырьков и их последующего коллапса, который приводит к эрозии металлических поверхностей.

Ключевые слова: клапан, кавитация, картина распределения, сепаратор, отверстия, вращение, моделирование, делитель потока.

Регулирующие клапаны осесимметричного типа являются одними из наиболее эффективных типов регулирующей арматуры, широко применяемой в химической, нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности [1-3].

Современные конструкции клапанов данного типа имеют возможность работы практически в любых условиях эксплуатации, в том числе, в режимах с высокими перепадами давлений, где возможна кавитация [4].

Для борьбы с кавитационными эффектами в данном классе арматуры предусмотрены различные технические решения [5-7]. Наибольшее распространение получили рассеивающие элементы – делители потока перфорированного типа (сепараторы) с использованием которых поток разбивается на радиальные струи, направленные внутрь. При этом образуемые кавитационные пузыри смещаются от стенок клапана внутрь потока, что предотвращает кавитационное разрушение.

Размеры, форма и расположение отверстий в делителях потока существенно влияют на эффективность рассеивания энергии и предотвращение возникновения кавитации.

В большинстве конструкций современных осевых клапанов применяется поршневое перекрытие отверстий в делителе потока, при котором происходит последовательное закрытие-открытие отверстий в сепараторе.

Однако на начальных фазах открытия задействуются лишь первые, находящиеся у выходного патрубка, ряды отверстий. Это может привести к возникновению интенсивных завихрений, обратных токов и, самое главное, резкому возрастанию скоростей жидкости при прохождении отверстий в делителе, при которых возможно возникновение кавитация, приводящей к разрушению деталей как самого клапана, так и трубопровода [8-10].

С целью предотвращения кавитации производители осевой регулирующей арматуры применяют делители потока с отверстиями малого диаметра. Однако такие сепараторы имеют более сложную конструкцию, высокую стоимость изготовления и повышенное гидравлическое сопротивление в открытом положении.

К рассмотрению предлагается новый способ осуществления изменения проходного сечения – «короткоходный» принцип, при котором все отверстия в делителе потока перекрываются одновременно. Такое конструктивное исполнение позволяет обеспечить интенсивное рассеивание энергии по всей длине сепаратора на начальном этапе открытия и сравнительно малое сопротивление в открытом. Стоит отметить, что «короткоходный» принцип может быть реализован в двух вариантах – вращательном и поступательном. Схема клапана такого типа показана на рис. 1.

Для подтверждения данного решения были проведены сравнительные численные исследования процесса течения жидкости через клапан с

различными делителями потока. Были использованы три делителя потока с классическим поршневым механизмом регулирования и сепаратор реализующий вращательный «короткоходный» принцип.

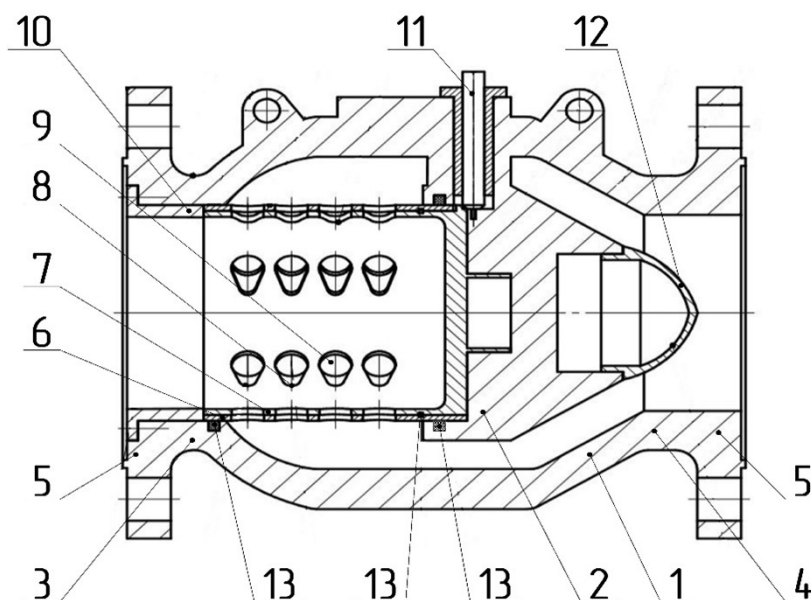


Рис. 1. – Схема осевого регулирующего клапана с запирающим устройством поворотного типа [xx]: 1 – внешний корпус, 2 – внутренний корпус, 3 – выходной патрубок, 4 – входной патрубок, 5 – фланец, 6 – делитель потока (сепаратор), 7 – запирающий орган, 8 – отверстие криволинейной формы, 9 – отверстия, 10 – расширительная втулка, 11 – вал, 12 – заглушка, 13 – уплотнение

В программном продукте КОМПАС-3D v23 [xx] была спроектирована упрощенная модель осевого клапана, а именно корпус и делители потока (сепараторы). Габаритные размеры модели представлены на рис. 2. Сепараторы смоделированы трех конструкций с эквивалентными размерами:

- 1) 5-ти рядный, $D_{\text{отв}} = 14,0$ мм;
- 2) 10-ти рядный, $D_{\text{отв}} = 7,0$ мм;
- 3) 19-ти рядный, $D_{\text{отв}} = 3,5$ мм.

Численное моделирование клапана производилось в программном продукте SolidWorks Flow Simulation [xx] со следующими исходными данными: модель k-ε; модельная жидкость – вода; объемный расход на входе – 250 м³/ч; статическое давление на выходе – $P_{ст} = 0,6$ МПа; интенсивность турбулентности – 5%; масштаб турбулентности – 0,0005 м.

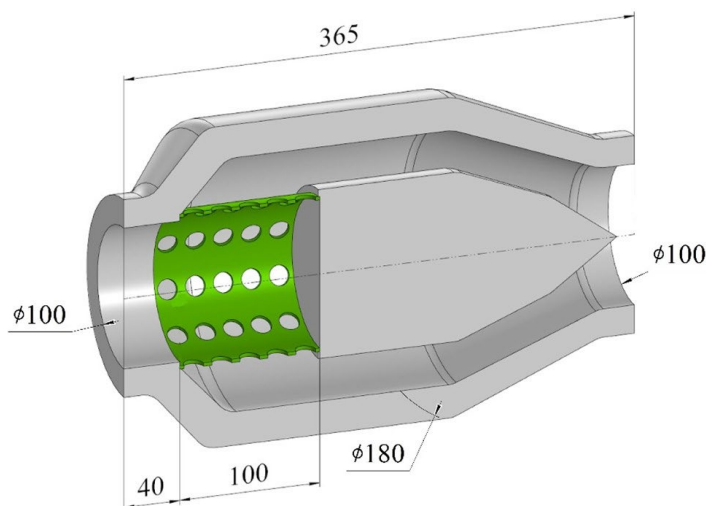


Рис. 2. – Упрощенная модель клапана для численного моделирования

Результаты численных исследований (картины распределения скорости и давления) течения жидкости через клапан на начальных фазах открытия, где имеет место максимальные скорости течения и наибольшая вероятность возникновения кавитации, представлены на рисунках 3-6.

Из рис. 3 видно, что в отверстиях делителя потока наблюдается резкое возрастание скоростей и, соответственно, приводит к падению давления. Это может привести к вскипанию жидкости и последующим схлопыванием образованных пузырьков. Несмотря на то, что конструкции осевых клапанов разработаны таким образом, что образованные пузырьки движутся к центру потока, при их разрушении сформированные струи могут достигнуть внутренних деталей и привести к разрушению. Кроме того, возникновение кавитации приводит к появлению шумов и вибраций клапана.

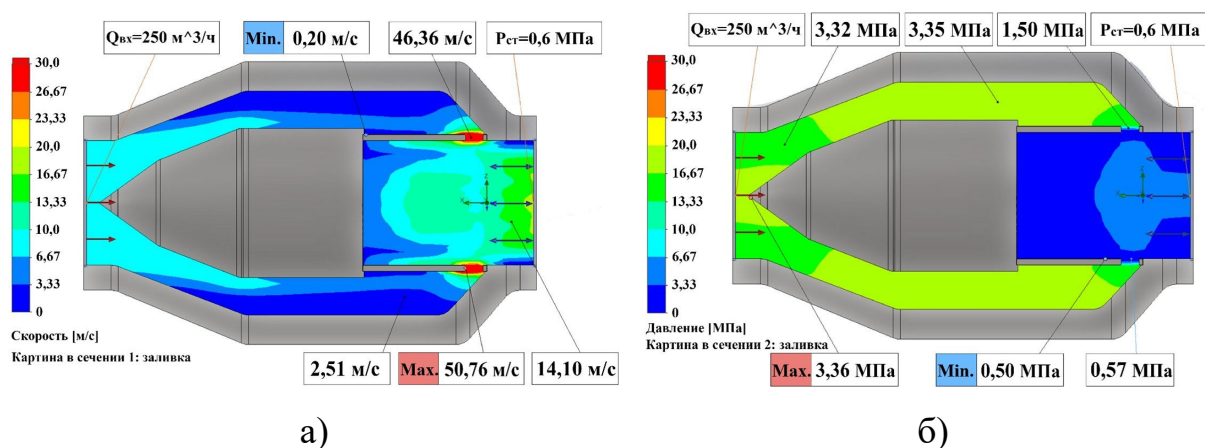


Рис. 3. – Сепаратор 5-ти рядный, $D_{\text{отв}} = 14,0$ мм:

а) распределение скорости; б) распределение давления

Следующие результаты распределения скоростей (рис. 4) получены для клапана с делителем потока, имеющем отверстия в два раза меньше, но при этом суммарное проходное сечение не изменилось.

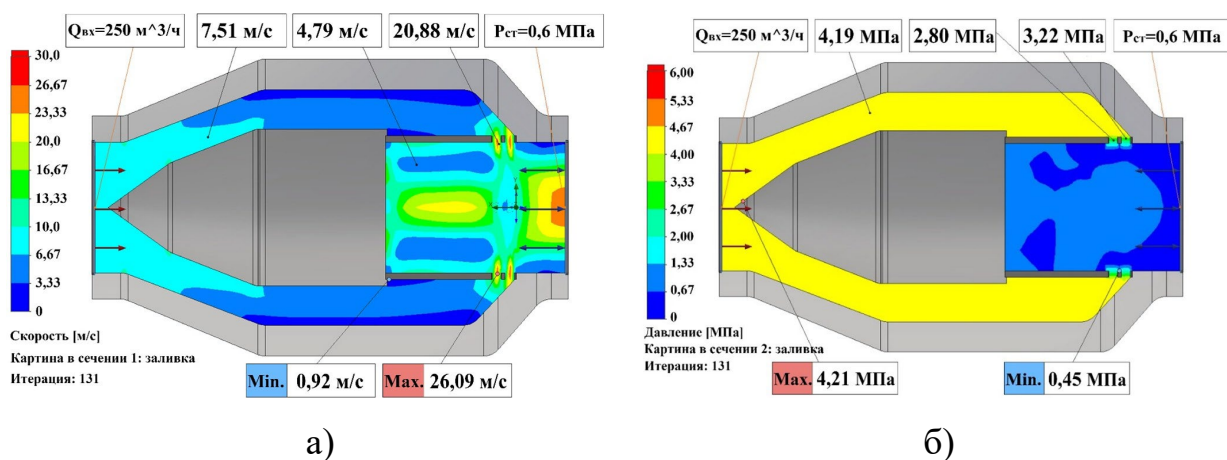


Рис. 4. – Сепаратор 10-ти рядный, $D_{\text{отв}} = 7,0$ мм:

а) распределение скорости; б) распределение давления

В этом случае наблюдается более плавное падение скорости и давления по сравнению с предыдущим вариантом. Однако также присутствуют зоны циркуляции жидкости внутри делителя потока, которые отрицательно

сказываются на гидравлическом сопротивлении клапана, а также приводит к искажению радиального направления струй.

При уменьшении диаметра отверстий в 4 раза (рис. 5) распределение скорости имеет более плавный переход, при этом значение максимальной скорости изменилось незначительно, в то время как, максимальное давление увеличилось в 1,5 раза.

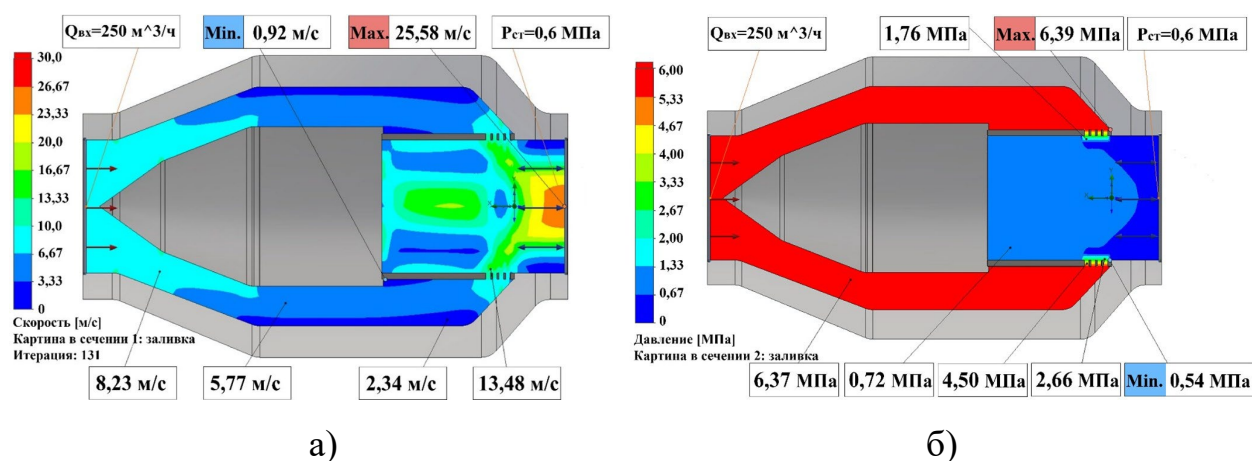


Рис. 5. – Сепаратор 19-ти рядный, $D_{\text{отв}} = 3,5$ мм:

а) распределение скорости; б) распределение давления

Данный режим течения практически полностью исключает возникновению кавитации. Тем не менее, использование клапанов с распределителями потока, обладающих незначительными размерами проходных сечений, ограничивает их применение в процессах регулирования объемов жидкостей, содержащих примеси и твёрдые включения. В дополнение к этому, подобные распределители потока отличаются повышенной сложностью производства и, как следствие, значительной стоимостью.

На рис. 6 изображено распределение скоростей и давления жидкости для «короткоходного» клапана. Конструкция сепаратора (два 5-ти рядных) представляет собой элемент типа «труба в трубе», отверстия смещены относительно оси на 10 градусов. В данном случае размер отверстий в

сепараторе соответствует размеру отверстий клапана на рис. 2. При этом суммарное проходное сечение во всех случаях одинаковое.

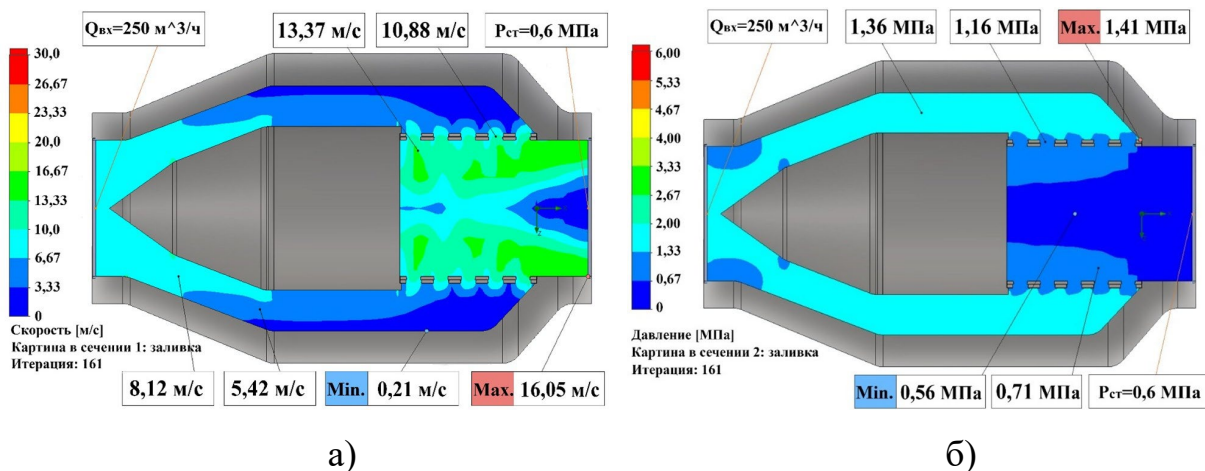


Рис. 6. – Сепараторы 5-ти рядные, $D_{отв} = 14,0 \text{ мм}$, смещение по осям сепараторов – 10 градусов:

а) распределение скорости; б) распределение давления

Анализируя полученные картины распределения, можно сделать вывод, что для достижения плавного изменения скоростей при незначительных фазах открытия, эффективно применять не только делители потока с уменьшенными диаметрами отверстий, но и клапаны «короткоходного» исполнения. В конструкции «короткоходного» клапана допускается использование делителя потока с увеличенными отверстиями.

Таким образом, применение клапанов «короткоходного» исполнения позволит использовать для предотвращения кавитации делители потока с более крупными отверстиями по сравнению с клапанами классического типа при одинаковой способности снижения кавитации. Кроме того, клапаны «короткоходного» исполнения могут быть использованы в качестве антипомпажных, где требуется высокая скорость регулирования.

Литература

1. Ni L.-X., Chen Z.-S., Liu Z., Feng X.-F. Hydrodynamic analysis of ultrahigh pressure water derusting nozzle // Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. 2020. pp.1842-1850.
2. Гуревич Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры. Изд. 5-е. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 480 с.
3. Пасько П.И. Исследование гидродинамики осесимметричных клеточных регулирующих клапанов для трубопроводов ТЭС и АЭС: автореферат дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.14. Новочеркасск. 2008. 20 с.
4. 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.
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. Шпилькин Д.В., Капанова А.Б., Лебедев А.Е. Анализ конструктивных решений для повышения эффективности работы клапанов с перфорированными цилиндрами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 7. С. 382-385.
7. Лебедев А.Е., Капанова А.Б., Мельцер А.М., Воронин Д.В., Неклюдов С. В., Серов Е.М. Закрытое акционерное общество "Научно-производственное объединение РЕГУЛЯТОР" ЗАО "НПО РЕГУЛЯТОР". Прямоточный регулирующий клапан. Патент. 2702027. Российская Федерация. МПК F16K 1/12, F16K 1/54. Номер заявки 2019105176. Дата подачи 25.02.2019. Дата публикации 03.10.2019. Бюл. №28.
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. Ватагин А.А., Лебедев А.Е., Гуданов И.С., Долгин Д.С., Оборин А.В. Экспериментальное исследование формирования кавитационных пузырей в осевых клапанах // Инженерный вестник Дона. 2025. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2025/10335.

10. Лебедев А.Е., Ватагин А.А., Гуданов И.С., Долгин Д.С., Королёв И.П. Моделирование процесса формирования кавитационных пузырей в осевых клапанах // Инженерный вестник Дона. 2025. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10077.

References

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

2. Gurevich D.F. Raschet i konstruirovaniye truboprovodnoj armatury [Calculation and construction of pipe fittings]. Izd. 5-e. M.: Izdatel'stvo LKI, 2008. 480 p.

3. Pas'ko P.I. Issledovanie gidrodinamiki osesimmetrichnykh kletochnykh regulirujushhih klapanov dlja truboprovodov TJeS i AJeS [Study of the hydrodynamics of axisymmetric cellular control valves for TPP and NPP pipelines]: avtoreferat diss. ... kand. tehn. nauk: 05.14.14. Novocherkassk. 2008. 20 p.

4. 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.

5. Kulagin V.A., Sokolov N.Yu. Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii. Oblast': Fizika. 2014. № 7. pp. 872-880.

6. Shpil'kin D.V., Kapranova A.B., Lebedev A.E. Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. 2024. Vyp. 7. pp. 382-385.

7. Lebedev A.E., Kapranova A.B., Melzer A.M., Voronin D.V., Neklyudov S.V., Serov E.M. Closed Joint-Stock Company "Scientific and Production Association REGULATOR" CJSC "NPO REGULATOR". Direct-Flow Control



Valve. Patent. 2702027. Russian Federation. IPC F16K 1/12, F16K 1/54. Application number 2019105176. Date of filing 25.02.2019. Date of publication 03.10.2019. Bulletin No. 28.

8. Neklyudov S.V. Process gidrodinamicheskoy kavitacii 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. Vatagin A.A., Lebedev A.E., Gudanov I.S., Dolgin D.S., Oborin A.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2025/10335.

10. 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.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 11.10.2025

Дата публикации: 26.11.2025