

УДК 621.646

Применение структурного подхода к проектированию трубопроводной арматуры

И.Р. Чиняев

ООО НПФ «МКТ-АСДМ»

Structural approach application in the pipeline valves design

I.R. Chinyaev

Scientific Production Company "MKT-ASDM" LLC

Экономические условия предполагают необходимость укрепления технологического суверенитета России, особенно в критически важных отраслях промышленности, к числу которых относятся нефтегазовая, химическая и энергетическая отрасли. В значительной степени стабильность работы этих отраслей зависит от наличия и качества трубопроводной арматуры, которая до недавнего времени импортировалась в значительных объемах. В целях снижения зависимости от внешних поставок критически важно развивать собственное производство. Для обеспечения высоких стандартов и качества производимой арматуры необходимо использовать структурный подход к процессу проектирования, позволяющий систематизировать и согласовывать внешние условия с внутренними возможностями и требованиями к изготовлению изделий. Рассмотрены особенности применения структурного подхода к проектированию трубопроводной арматуры. Анализ полученных результатов позволяет заключить, что использование структурного подхода даст возможность сократить сроки освоения новых видов арматуры и наладить эффективное отечественное производство.

EDN: VFHIKG, <https://elibrary/vfhikg>**Ключевые слова:** трубопроводная арматура, структурный подход, элемент системы трубопроводов

Current economic situation requires strengthening the technological sovereignty of Russia, especially in the critical industries, including oil and gas production, chemical and power industries. Stability of these industries significantly depends on availability and quality of the pipeline fittings, which until recently were imported in large volumes. In order to reduce dependence on the external supply, it becomes critical to develop the domestic production. Ensuring high standards and quality in fittings manufacture requires introduction of the structural approach in the design process making it possible to systematize and coordinate external conditions with the internal capabilities and requirements for the products manufacture. The paper considers features of applying the structural approach to the pipeline fittings design. Analysis of the obtained results makes it possible to conclude that using the structural approach allows reducing the time it takes to master the new types of fittings and establishing the efficient domestic production.

EDN: VFHIKG, <https://elibrary/vfhikg>**Keywords:** pipeline fittings, structural approach, pipeline system element

Трубопроводная арматура (ТПА) получила распространение во многих отраслях промышленности. Она необходима для транспортирования жидкостей (топлива и химикатов) и газов. ТПА является неотъемлемым элементом инженерных коммуникаций (распределяющих внутри объектов воздух, пар, воду, сжатый воздух, топливо и др.), используемых в промышленном процессе или для его поддержания [1].

ТПА применяют на химических и нефтехимических заводах, нефте- и газоперерабатывающих предприятиях, фармацевтическом производстве и целлюлозно-бумажных комбинатах, а также в промышленных трубопроводах для транспортирования коррозионных или токсичных жидкостей.

Масштабное использование ТПА находит на всех стадиях добычи, подготовки, транспортирования, хранения и распределения природного газа на предприятиях газовой и газотранспортной промышленности (рис. 1). Существует и много других мест применения ТПА, например, предприятия по производству полупроводников, автомобильные и авиационные заводы, учреждения по очистке и фильтрации воды и др. [2] Очень значимое место ТПА занимает в транспортной, авиационно-космической и оборонной технике.

Очевидно, что ТПА как технологический компонент многих критически важных систем

требует особого внимания на этапе ее проектирования, производства и монтажа для обеспечения безопасной эксплуатации с учетом высокой вероятности выхода из строя. Неисправность может привести к техногенным авариям, связанным с загрязнением внешней среды, разрушением дорогостоящих активов и гибелью людей [3]. Правильная установка и обслуживание ТПА требуют специальных процессов на протяжении всего ее жизненного цикла.

В последнее время проектирование ТПА стало особенно значимым и важным для России, так как с момента введения санкций остро встал вопрос импортозамещения, и технологического суверенитета нашей страны. Например, в 2014 г. нефтегазохимическая промышленность зависела от поставок запорной арматуры из стран Японии, США и Евросоюза на 70 %, а шельфовая добыча газа и нефти — на 100 %. Согласно статистическим данным, нефтегазовая отрасль импортировала ежегодно 55 % общего объема потребления ТПА. Запорная арматура поступала в РФ в следующем количестве, %: из Италии — 29, из Германии — 24, из Чехии — 11, из США — 10, из Франции — 9, из Венгрии — 5; из Японии — 4, из других стран — 8 [4].

Импортозамещение в нефтегазохимической отрасли стало не просто ответом на внешние вызовы, но и стратегическим шагом к обеспечению технологической независимости страны.



Рис. 1. Пример трубопроводов с ТПА

Кроме того, бурный рост освоения новых видов ТПА связан с тем, что без развития собственного производства с учетом степени износа имеющейся ТПА развитие многих перечисленных отраслей останавливалось бы уже через 4–5 лет.

На сегодняшний день основной проблемой производителей ТПА в России являются вопросы, касающиеся ее проектирования, производства и стандартизации [5]. Поэтому необходимо структурировать отрасль производства ТПА и провести детальный анализ с целью снижения издержек при освоении новых видов изделий и сокращения сроков выхода на рынок.

Структурный подход является фундаментальным этапом исследования, проектирования и модификации любой системы, ориентированным на два основных аспекта: внутреннюю структуру объекта исследования и роли каждого ее элемента.

Целью структурного анализа являются: установление и исследование целостности объекта, его состава и структурных компонентов; анализ взаимосвязей между элементами систе-

мы; определение функций всей системы в целом и ее отдельных частей. Сущность структурного подхода состоит в представлении объектов в качестве систем [6]. Одним из основных признаков системы является наличие у всех элементов общей цели.

В качестве примера на рис. 2 приведена многоуровневая система процесса управления потоками рабочей среды (РС) для шиберного запорно-регулирующего устройства (ШЗРУ). В ООО НПФ «МКТ-АСДМ» разработан ряд ШЗРУ со стабилизатором потока РС (рис. 3) как новый подтип ТПА запорно-регулирующей задвижки [7–10].

Первые два уровня факторов (см. рис. 2) определяются условиями эксплуатации. Эти факторы для средств управления потоками РС являются внешней средой и считаются заданными для проектирования и выбора перспективной ТПА и методов ее рационального использования.

К управляемым факторам относятся технические и организационные. Технические возможности ТПА можно реализовать с учетом



Рис. 2. Многоуровневая система процесса управления потоками РС

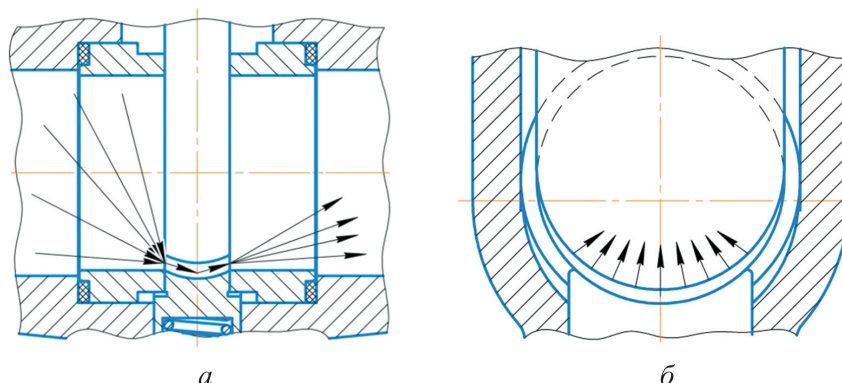


Рис. 3. Схема затвора ШЗРУ со стабилизатором потока РС

использования всей гаммы организационных факторов. Организационные факторы задают исходный уровень требований к техническим параметрам ТПА [11]. Для успешной работы ТПА необходимо развитие всех этапов — от производства до потребления. Нефтегазовая, энергетическая и другие отрасли являются потребителями ТПА. Точность регулирования определяет нагрузку и эффективность всего технологического оборудования.

Целью определения рациональных параметров ТПА является выполнение процесса управления потоками РС с максимальной точностью при минимальных эксплуатационных затратах. Системный подход к исследованию проблемы ориентирует на выбор такого решения, которое в наибольшей степени соответствует целям, стоящим перед системой, в том числе приведение в соответствие решений по частным вопросам [12–16].

Рассмотрим процесс управления потоками РС в процессе разработки ТПА. В качестве примера выступает ШЗРУ, которое представлено в виде системы с использованием модели черного ящика.

Метод черного ящика исходит из теоретического представления о том, что функция как проявление поведения ШЗРУ в определенных границах является результатом трансформации входных величин (давления и расхода РС до ШЗРУ) в выходные (давление и расход РС после ШЗРУ). Из анализа различий между состояниями потока РС до и после ШЗРУ, а также реакции на выходной стадии определяется поведение, т. е. функция объекта как целенаправленной системы [17].

К параметрам внешней среды относятся среда, в которой работает ШЗРУ (воздух, грунт, вода), температура t , снежная нагрузка, сей-

смичность и др. Технологические параметры (давление p и его перепад, расход Q и свойства РС и др.) определены заказчиком и указаны в опросном листе. Внутренние связи учитывают влияние воздействия ШЗРУ на поток РС и взаимодействие между струями и выделенными объемами потока.

Входными управляющими параметрами являются конструктивно-кинематические параметры ШЗРУ: форма и размеры каналов, ход регулирующих элементов. В качестве выходных параметров выступают расход РС, поля давлений РС, скоростей течения потока и объемной кавитации после затвора, а также расположение струй в потоке, движущихся с максимальной скоростью, и местоположение схлопывания кavitационных пузырьков [18–21].

Модель системы в виде черного ящика «Управление потоками РС» показана на рис. 4.

ШЗРУ можно классифицировать по нескольким признакам (рис. 5):

- со стабилизатором потока — без защиты и с защитой пружины стабилизатора от воздействия РС;
- с внутренним байпасом — с заслонкой внутри шибера и фиксаторами в РС, с заслон-

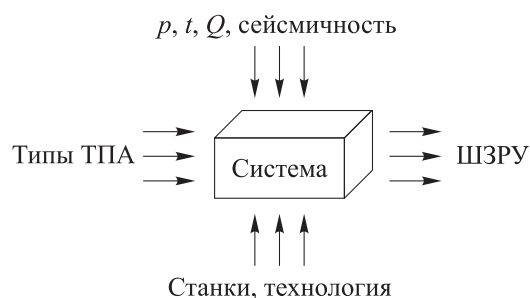


Рис. 4. Модель системы в виде черного ящика «Управление потоками РС» и ее реакции (на примере ШЗРУ)



Рис. 5. Классификация ШЗРУ

кой перед шибером, с заслонкой перед шибером и дроссельными пластинами в канале шибера, с клапаном в шибере;

- с дроссельными пластинами — в седлах (входном, выходном и обоих), патрубках (входном, выходном и обоих), канале шибера и с требуемой пропускной характеристикой при многоступенчатом дросселировании пластинами;

- со встроенным обратным клапаном в затворе;

- с плавающими седлами (не имеющие жесткого крепления в корпусе ШЗРУ и самоустанавливающиеся в процессе работы).

По конструкции привода ШЗРУ подразделяют на три группы: с фиксаторами в РС; с рычагами; с телескопическим шпинделем и фиксаторами вне РС (рис. 6).

Рассмотрим структурный подход к системе научно-теоретических, проектных и расчетных работ при создании ШЗРУ.

Система научно-теоретических, проектных и расчетных работ при создании ШЗРУ включает в себя следующие этапы:

- анализ износа ТПА при эксплуатации;
- применение аналитического метода расчета гидравлических и силовых характеристик ШЗРУ в MathCAD;

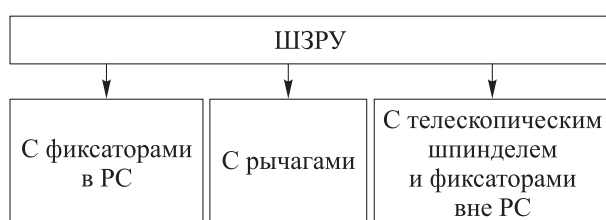


Рис. 6. Классификация ШЗРУ по конструкции привода

- численное исследование гидравлических и кавитационных характеристик ШЗРУ;

- экспериментальное определение гидравлических характеристик ТПА;

- анализ экспериментальных гидравлических характеристик ТПА;

- анализ методик экспериментального определения кавитационных характеристик ТПА;

- разработка методики экспериментального определения кавитационных характеристик ТПА;

- экспериментальное определение кавитационных характеристик ШЗРУ с внутренним байпасом;

- расчетное и экспериментальное определение сил на шпинделе и моментов на маховике ШЗРУ с внутренним байпасом;

- обоснование площади канала в шибере ШЗРУ с внутренним байпасом;

- расчет удельных давлений на уплотнительных полях в затворе ШЗРУ во всем диапазоне хода регулирующих элементов;

- верификация математических моделей.

Методика проектирования ШЗРУ с требуемой пропускной характеристикой при многоступенчатом дросселировании состоит из следующих этапов:

- расчет безразмерной пропускной характеристики;

- вычисление доли пропускной способности каждого канала для десяти положений регулирующего элемента по его ходу;

- определение требуемой условной пропускной способности Kv_y ;

- расчет пропускной характеристики, соответствующей ГОСТ с заданной Kv_y ;

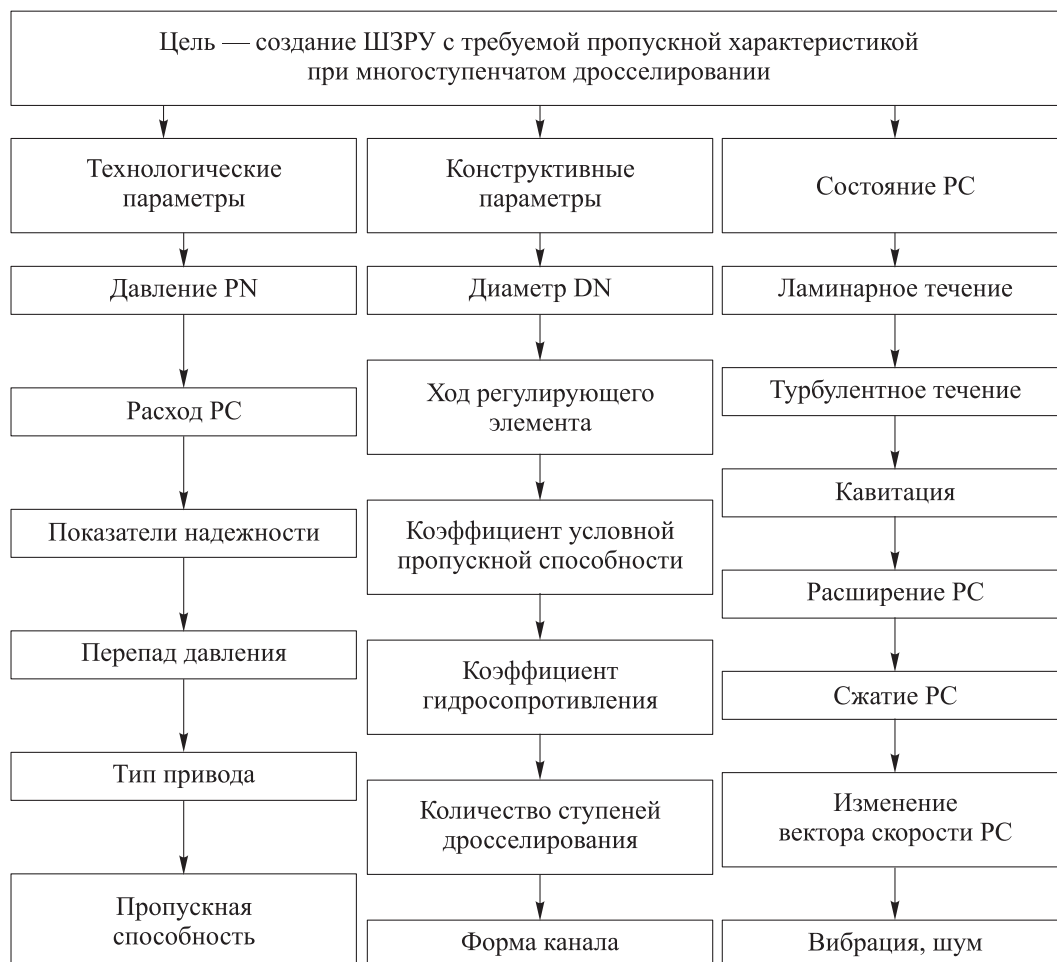


Рис. 7. Структура системы проектирования ШЗРУ с требуемой пропускной характеристикой при многоступенчатом дросселировании

- вычисление пропускной способности каждого канала;
- определение коэффициентов сопротивления каналов и количества дросселирующих пластин; расчет площади каналов в пластинах;
- профилирование каналов;
- расчет пропускной характеристики ШЗРУ и ее верификация;
- корректировка формы и размеров каналов.

На основании изложенного процесс разработки ШЗРУ при минимальных затратах можно представить в виде структурированной системы проектирования ШЗРУ с требуемой пропускной характеристикой при многоступенчатом дросселировании (рис. 7).

Выводы

1. Структурный подход к созданию ТПА является фундаментальным этапом исследова-

ния, проектирования и модификации, ориентированным на два основных аспекта: внутреннюю структуру объекта исследования и роль каждого ее элемента. Цель структурного подхода при проектировании ТПА заключается в установлении и исследовании факторов, влияющих на процесс управления потоками РС, и в анализе взаимосвязей между элементами системы.

2. Внешней средой для расчета служат технологические параметры (давление и его перепад, расход и свойства РС и др.), которые определены заказчиком и указаны в опросном листе. В качестве внутренних связей выступают технологические возможности производства. Входными параметрами являются характеристики существующей ТПА, выходными — ТПА с требуемыми техническими характеристиками.

Литература

- [1] Тер-Матеосянц А.И. Особенности экспертизы происхождения трубопроводной арматуры в целях отнесения ее к продукции, произведенной на территории России. *Арматуростроение*, 2021, № 4, с. 62–64.
- [2] Мурзабаев М.Ю. Применение сдвоенной трубопроводной арматуры в химической и нефтехимической отраслях. *Арматуростроение*, 2021, № 6, с. 24–25.
- [3] Афанасьева О.В. Вопросы импортозамещения трубопроводной арматуры в химической промышленности. *Арматуростроение*, 2024, № 1, с. 20–24.
- [4] Пантелеев А.С. Современные тенденции и подходы к изготовлению трубопроводной арматуры. *Фундаментальные основы механики*, 2023, № 11, с. 106–113, doi: <https://doi.org/10.26160/2542-0127-2023-11-106-113>
- [5] Zhang G., Zhang H.T., Wu Z.Y. et al. Experimental studies of cavitation evolution through a butterfly valve at different regulation conditions. *Exp. Fluids*, 2024, vol. 65, no. 4, doi: <https://doi.org/10.1007/s00348-023-03743-3>
- [6] Шумкин А.В. Организация системы контроля технического обслуживания трубопроводной арматуры магистральных газопроводов. *Современные наукоемкие технологии*, 2022, № 8, с. 103–108, doi: <https://doi.org/10.17513/snt.39274>
- [7] Фоминых А.В., Чиняев И.Р., Шанаурин А.Л. Способ снижения кавитации в регулирующей трубопроводной арматуре. Патент РФ 2819248. Заявл. 19.07.2023, опубл. 15.05.2024.
- [8] Заславский Г.А., Рязанов В.А., Чиняев И.Р. и др. Запорно-регулирующая задвижка. Патент РФ 2464470. Заявл. 29.06.2010, опубл. 20.10.2012.
- [9] Заславский Г.А., Рязанов В.А., Сухов С.А. и др. Запорно-регулирующее устройство. Патент РФ 2586958. Заявл. 21.11.2014, опубл. 10.06.2016.
- [10] Махов А.А., Муфтахов В.З., Фоминых А.В. и др. Шибберное запорно-регулирующее устройство. Патент РФ 217661 РФ. Заявл. 27.04.2022, опубл. 11.04.2023.
- [11] Акопджанян С.Г. Преимущества применения гидроприводов для управления непонповоротной трубопроводной арматурой. *Арматуростроение*, 2021, № 3, с. 48–49.
- [12] Тихоненко К.А. Разработка программных приложений по подбору и расчету надежности трубопроводной арматуры. *Вестник ТГТУ*, 2023, т. 29, № 4, с. 562–573.
- [13] Abdallah H.K., Ben-Mansour R., Li S. Numerical study of erosion phenomena with the presence of cavitation at deflector jet servo-valve. *Arab. J. Sci. Eng.*, 2024, vol. 49, no. 2, pp. 2797–2811, <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08427-y>
- [14] Gao G., Guo S., Li D. A review of cavitation erosion on pumps and valves in nuclear power plants. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 5, art. 1007, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17051007>
- [15] Xin G.Z., Yue Y., Wu J. et al. The flow and cavitation characteristics of cage-type control valves. *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.*, 2021, vol. 15, no. 1, pp. 951–963, doi: <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1932604>
- [16] Qiu T., Yang L., Zhang J. et al. Investigation of valve seat cone angle on small opening direct-acting relief valve cavitation noise. *Machines*, 2024, vol. 12, no. 7, art. 434, doi: <https://doi.org/10.3390/machines12070434>
- [17] Крамсаков Д.Е. Новый подход к проектированию запорно-регулирующей трубопроводной арматуры. *Вестник Курганской ГСХА*, 2024, № 2, с. 53–61.
- [18] Буданов А.В. Определение гидравлических характеристик трубопроводной арматуры при использовании конечно-элементного анализа. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*, 2023, № 3, с. 181–189.
- [19] Скрыбин В.А. Совершенствование технологии и оборудования при восстановлении деталей трубопроводной арматуры. *Ремонт. Восстановление. Модернизация*, 2024, № 8, с. 17–26.
- [20] Шпаков О.Н. Промышленная трубопроводная арматура — основное устройство в трубопроводных системах. *Арматуростроение*, 2021, № 5, с. 30–37.
- [21] Кривцов Ю.С. Оценка способности к сопротивлению разрушению криогенных сталей при выборе материалов для деталей трубопроводной арматуры. *Трубопроводная арматура и оборудование*, 2021, № 4, с. 43–45.

References

- [1] Ter-Mateosyants A.I. Peculiarities of expertise of the origin of pipeline valves in order to classify them as products manufactured in Russia. *Armaturostroenie*, 2021, no. 4, pp. 62–64. (In Russ.).
- [2] Murzabaev M.Yu. Application of dual pipeline valves in chemical and petrochemical industries. *Armaturostroenie*, 2021, no. 6, pp. 24–25. (In Russ.).
- [3] Afanasyeva O.V. Issues of import substitution of pipeline valves in the chemical industry. *Armaturostroenie*, 2024, no. 1, pp. 20–24. (In Russ.).
- [4] Pantelev A.S. Current trends and approaches to the manufacture of pipeline valves. *Fundamentalnye osnovy mekhaniki*, 2023, no. 11, pp. 106–113, doi: <https://doi.org/10.26160/2542-0127-2023-11-106-113> (in Russ.).
- [5] Zhang G., Zhang H.T., Wu Z.Y. et al. Experimental studies of cavitation evolution through a butterfly valve at different regulation conditions. *Exp. Fluids*, 2024, vol. 65, no. 4, doi: <https://doi.org/10.1007/s00348-023-03743-3>
- [6] Shumkin A.V. Organization of the control system for maintenance of pipeline fittings of main gas pipelines. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern High Technologies], 2022, no. 8, pp. 103–108, doi: <https://doi.org/10.17513/snt.39274> (in Russ.).
- [7] Fominykh A.V., Chinyaev I.R., Shanaurin A.L. *Sposob snizheniya kavitatsii v reguliruyushchey truboprovodnoy armature* [Method of reducing cavitation in control pipeline valves]. Patent RU 2819248. Appl. 19.07.2023, publ. 15.05.2024. (In Russ.).
- [8] Zaslavskiy G.A., Ryazanov V.A., Chinyaev I.R. et al. *Zaporno-reguliruyushchaya zadvizhka* [Shutoff and control gate valve]. Patent RU 2464470. Appl. 29.06.2010, publ. 20.10.2012. (In Russ.).
- [9] Zaslavskiy G.A., Ryazanov V.A., Sukhov S.A. et al. *Zaporno-reguliruyushchee ustroystvo* [Shutoff-control device]. Patent RU 2586958. Appl. 21.11.2014, publ. 10.06.2016. (In Russ.).
- [10] Makhov A.A., Muftakhov V.Z., Fominykh A.V. et al. *Shibernoe zaporno-reguliruyushchee ustroystvo* [Shut-off and regulating device]. Patent RU 217661 RF. Appl. 27.04.2022, publ. 11.04.2023. (In Russ.).
- [11] Akopdzhanyan S.G. Advantages of using hydraulic actuators to control part-turn valves. *Armaturostroenie*, 2021, no. 3, pp. 48–49. (In Russ.).
- [12] Tikhonenko K.A. Development of software applications for selection and calculation of reliability of pipeline fittings. *Vestnik TGTU* [Transactions of the TSTU], 2023, vol. 29, no. 4, pp. 562–573. (In Russ.).
- [13] Abdallah H.K., Ben-Mansour R., Li S. Numerical study of erosion phenomena with the presence of cavitation at deflector jet servo-valve. *Arab. J. Sci. Eng.*, 2024, vol. 49, no. 2, pp. 2797–2811, <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08427-y>
- [14] Gao G., Guo S., Li D. A review of cavitation erosion on pumps and valves in nuclear power plants. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 5, art. 1007, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17051007>
- [15] Xin G.Z., Yue Y., Wu J. et al. The flow and cavitation characteristics of cage-type control valves. *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.*, 2021, vol. 15, no. 1, pp. 951–963, doi: <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1932604>
- [16] Qiu T., Yang L., Zhang J. et al. Investigation of valve seat cone angle on small opening direct-acting relief valve cavitation noise. *Machines*, 2024, vol. 12, no. 7, art. 434, doi: <https://doi.org/10.3390/machines12070434>
- [17] Kramsakov D.E. A new approach to shut-off and control pipe valves design. *Vestnik Kurganskoy GSKhA*, 2024, no. 2, pp. 53–61. (In Russ.).
- [18] Budanov A.V. Determination of hydraulic characteristics of pipeline fittings using finite element analysis. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3, pp. 181–189. (In Russ.).
- [19] Skryabin V.A. Improvement of technology and equipment for renewal of pipe fittings. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2024, no. 8, pp. 17–26. (In Russ.).
- [20] Shpakov O.N. Industrial pipeline valves — the basic device in pipeline systems. *Armaturostroenie*, 2021, no. 5, pp. 30–37. (In Russ.).

- [21] Krivtsov Yu.S. Estimation of fracture resistance capability of cryogenic steels at the choice of materials for parts of pipeline valves. *Truboprovodnaya armatura i oborudovanie*, 2021, no. 4, pp. 43–45. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 21.01.2025

Информация об авторе

ЧИНЯЕВ Ильгиз Рашитович — кандидат технических наук, учредитель. ООО НПФ «МКТ-АСДМ» (64000, Курган, Российская Федерация, ул. Набережная, д. 2а, e-mail: ruk_mkt@mail.ru).

Information about the author

CHINYAEV Ilgiz Rashitovich — Candidate of Science (Eng.), Founder. Scientific Production Company “MKT-ASDM” LLC (64000, Kurgan, Russian Federation, Naberezhnaya St., Bldg. 2a, e-mail: ruk_mkt@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Чиняев И.Р. Применение структурного подхода к проектированию трубопроводной арматуры. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 6, с. 96–104.

Please cite this article in English as:

Chinyayev I.R. Structural approach application in the pipeline valves design. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 6, pp. 96–104.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие
под редакцией В.Н. Богомолова**

«Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей»

Рассмотрены вопросы испытаний ракетного оружия. Показано, что процесс испытаний является составной частью проектирования и разработки образца ракетного оружия. Приведена классификация испытаний по видам и категориям, включающая в себя наземные и летные испытания, а также научно-исследовательские испытания, испытания на этапах опытно-конструкторской работы и серийного производства. Описаны методы, технические средства и оборудование для проведения испытаний ракетного оружия. Представлены фотоматериалы различных испытаний ракетного оружия, наглядно показывающие его функционирование.

Для студентов старших курсов, обучающихся по специальности 17.05.02 «Стрелково-пушечное, артиллерийское и ракетное вооружение», изучающих курсы «Испытания ракетного оружия», «Испытания ракетного и ствольного оружия». Пособие может быть полезно студентам смежных специальностей, аспирантам и инженерам.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>