

## Определение гидравлических характеристик трубопроводной арматуры при использовании конечно-элементного анализа

А.В. Буданов, Н.В. Петров, Ш.С. Нозирзода✉, Е.Д. Петрова

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород, Российская Федерация  
✉shoni\_@mail.ru

### Резюме

В работе рассмотрены способы определения гидравлических характеристик трубопроводной арматуры. Вычислена пропускная характеристика клеточного регулирующего клапана, а также проведено сравнение результатов стендовых испытаний и конечно-элементного анализа пропускной способности клапана в зависимости от степени открытия регулирующего органа «золотника». В исследовании использованы методы конечно-элементного моделирования и статистической обработки данных. Разработана 3D-модель арматуры, которая установлена на участке трубопровода. На первом этапе расчета проверена сходимость сетки, определен размер ее ячеек и влияние размера ячейки на результаты расчета. В соответствии с требованиями ГОСТ 34437-2018 предусмотрены участки трубопровода до и после арматуры. Построены графики пропускной характеристики клапана, полученной по итогам конечно-элементного моделирования, экспериментальной пропускной характеристики клапана, корреляция результатов конечно-элементного анализа и экспериментальных данных. Также построен график отклонения полученных значений. Можно сделать вывод, что конечно-элементный анализ необходим при проектировании клапанов на различных стадиях производства для снижения общих издержек. Предложения по практическому применению данных научного исследования заключаются в их использовании в проектировании объектов атомной и нефтегазовой промышленности. В научной работе указаны полученные расчетные и экспериментальные значения пропускной способности, а также дана оценка возможности применения конечно-элементного анализа при выполнении проектирования клапанов.

### Ключевые слова

моделирование, гидравлические характеристики, трубопроводная арматура, регулирующий клапан

### Для цитирования

Определение гидравлических характеристик трубопроводной арматуры при использовании конечно-элементного анализа / А.В. Буданов, Н.В. Петров, Ш.С. Нозирзода, Е.Д. Петрова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 181–189. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).181-189.

### Информация о статье

поступила в редакцию: 10.08.2023 г.; поступила после рецензирования: 15.09.2023 г.; принята к публикации: 18.09.2023 г.

## Determination of hydraulic characteristics of pipeline fittings using finite element analysis

A.V. Budanov, N.V. Petrov, Sh.S. Nozirzoda✉, E.D. Petrova

Yaroslav the Wise Novgorod State University, Velikii Novgorod, the Russian Federation  
✉shoni\_@mail.ru

### Abstract

In this paper, methods for determining the hydraulic characteristics of pipeline fittings are considered. The starting characteristic of the cellular control valve was determined, and the results of bench tests and the results of finite element analysis of the valve capacity were compared depending on opening degree of the regulating organ of the «spool». The method of finite element modeling and the method of statistical data processing are used. A 3D model of the fitting installed on the pipeline section has been developed. At the first stage of the calculation, the convergence of the grid was checked, the size of the grid cells and the effect of the cell size on the calculation results were determined. In accordance with the requirements of State Standard 34437-2018, sections of the pipeline before and after the fittings are provided. Graphs of the flow characteristics of the valve obtained from the results of the finite element simulation, the experimental flow characteristics of the valve, the correlation of the results of the finite element analysis and experimental data are constructed. A graph of the deviation of the obtained values was also plotted. It can be concluded that finite element analysis is necessary in the design of valves at various stages of production to reduce overall costs. Proposals for the practical application of the scientific research data are to use them in the design of nuclear and oil and gas industry facilities. The scientific work indicates the obtained calculated and experimental values of throughput, as well as assesses the possibility of using finite element analysis when designing valves.

**Keywords**

modeling, hydraulic characteristics, pipeline fittings, control valve

**For citation**

Budanov A.V., Petrov N.V., Nozirezoda Sh.S., Petrova E.D. Opredelenie gidravlicheskih kharakteristik truboprovodnoi armatury pri ispol'zovanii konechno-elementnogo analiza [Determination of hydraulic characteristics of pipeline fittings using finite element analysis]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 181–189. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).181-189.

**Article info**

Received: August 10, 2023; Revised: September 15, 2023; Accepted: September 18, 2023.

**Введение**

Применение технологий компьютерного моделирования, а именно конечно-элементного (КЭ) анализа, при проектировании тепломеханического оборудования является наиболее выгодным вариантом в текущих условиях рыночной экономики, так как позволяет сокращать экономические издержки, связанные с необходимостью проведения испытаний оборудования с целью подтверждения заданных технических характеристик. Одной из наиболее востребованных отраслей в рамках проведения КЭ анализа является атомная промышленность, так как стоимость изделий, обеспечивающих транспорт определенной среды для данной отрасли, значительно выше, чем для изделий общепромышленного типа. Высокая стоимость оборудования обусловлена значительным объемом контроля, проверок и испытаний, проводимых с целью подтверждения его качества, а также заявленных технических характеристик.

На этапе конструирования распространено проведение конечно-элементного моделирования с целью определения прочностных характеристик как деталей, так и сборочных элементов трубопроводов [1], а также гидравлические расчеты участков трубопровода [2–5].

Целью данного исследования является изучение пропускной характеристики клеткового регулирующего клапана, а также сравнение результатов натурных испытаний и математического моделирования пропускной спо-

собности в зависимости от степени открытия регулирующего органа «золотника». Аналогичные расчеты и сравнения с экспериментом проводились в исследовании [2] на примере шарового клапана.

**Методика исследования**

Основные использованные методы:

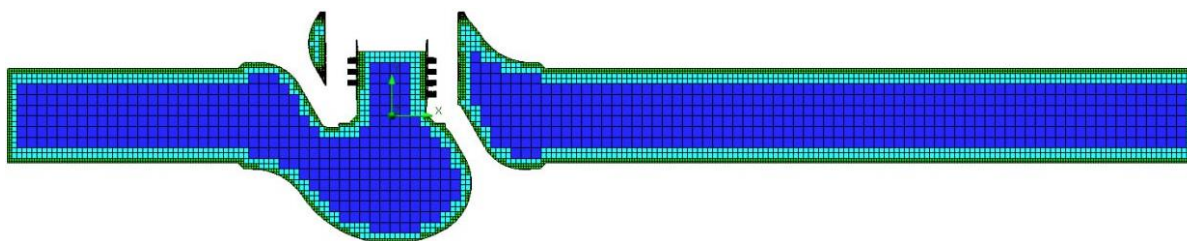
- метод КЭ моделирования [6–11];
- метод статистической обработки данных [12].

В рамках первого метода была разработана 3D-модель арматуры, устанавливаемая на участке трубопровода, которая соответствует геометрическим и физико-механическим параметрам реального образца, так как разработана в соответствии с реальной конструкторской документацией и техническими условиями.

Для проведения КЭ анализа необходимо подготовить 3D-модель клапана с целью исключения ошибок в решении, а именно устранить зазоры, а затем корректно построить расчетную сетку и задать исходные условия задачи.

**Результаты исследования**

На первом этапе расчета проверяется сходимость сетки (рис. 1). Здесь определяется размер ячеек сетки и его влияние на результаты расчета. Применение крупной сетки не позволит получить корректные параметры ввиду невозможности решения задачи в местах сужения потока, например, в отверстиях клетки. С другой



**Рис. 1.** Результат наложения сетки на элементы трубопровода  
**Fig. 1.** The result of the mesh overlay on the pipeline elements

стороны, слишком разреженная сетка потребует значительного машинного времени и ресурсов, что не всегда целесообразно.

Для данного моделирования применялась сетка с количеством элементов сетки 1 104 371.

Значения исходных данных:

- диаметр условный – 150 мм;
- скорость среды на входе – 0,5 м/с, рассчитана исходя из условия развитого турбулентного потока по аналогии с [13] и в соответствии с требованиями ГОСТ 34437–2018;
- модель турбулентности – *k-ε*;
- давление на выходе – 101 355 Па.

Применяемый тип конечного элемента –

гексаэдр, так как, согласно исследованиям [14, 15], применение данного типа конечного элемента повышает точность проводимого исследования. На рис. 2 приведены результаты наложения сетки в приближении.

В местах сужения, переходов, скруглений, а также определения пристеночного слоя выполнена локальная адаптация сетки, т.е. уменьшение размера ячейки с целью максимально точного повторения проточной части клапана (рис. 3).

Также в соответствии с требованиями ГОСТ 34437–2018 необходимо предусмотреть участки трубопровода до и после арматуры 2Dn

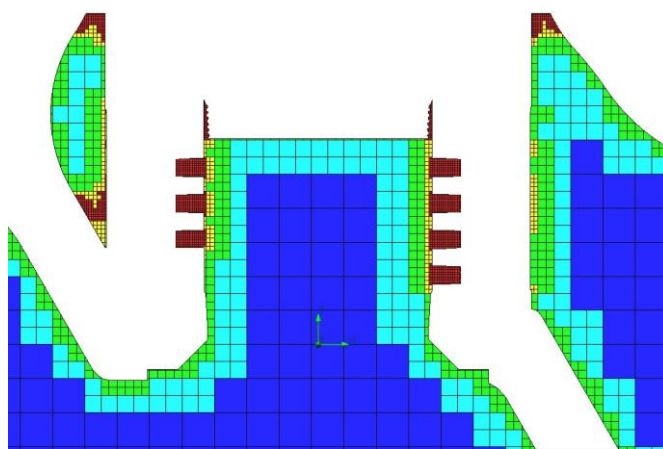


Рис. 2. Результат наложения сетки в приближении

Fig. 2. The result of the mesh overlay in the approximation

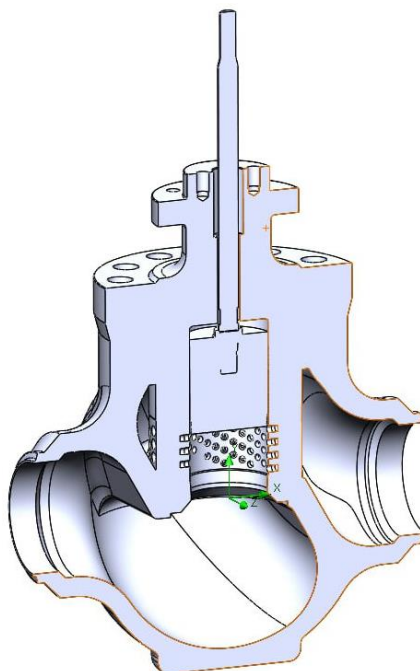


Рис. 3. 3D-модель арматуры в разрезе

Fig. 3. 3D-model of the fitting in the section

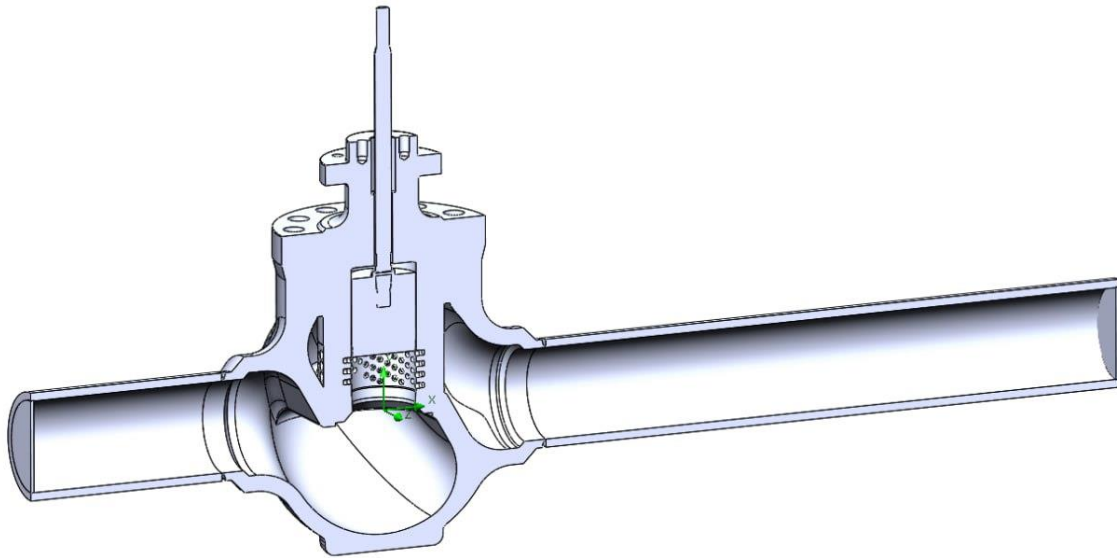


Рис. 4. 3D-модель арматуры с участками трубопровода  
Fig. 4. 3D-model of fittings with pipeline sections

и 6Dn соответственно. В данных точках производится замер параметров скорости и давления (рис. 4). Стабилизирующие участки 10Dn и 20Dn до и после арматуры не учитывались при моделировании ввиду того, что на входе задавалось граничное условие потока с развитым профилем скорости. Кроме того, при моделировании отсутствует источник возмущения потока перед клапаном, каким является вентилятор при натуральных испытаниях, а также элементы противодействия за клапаном.

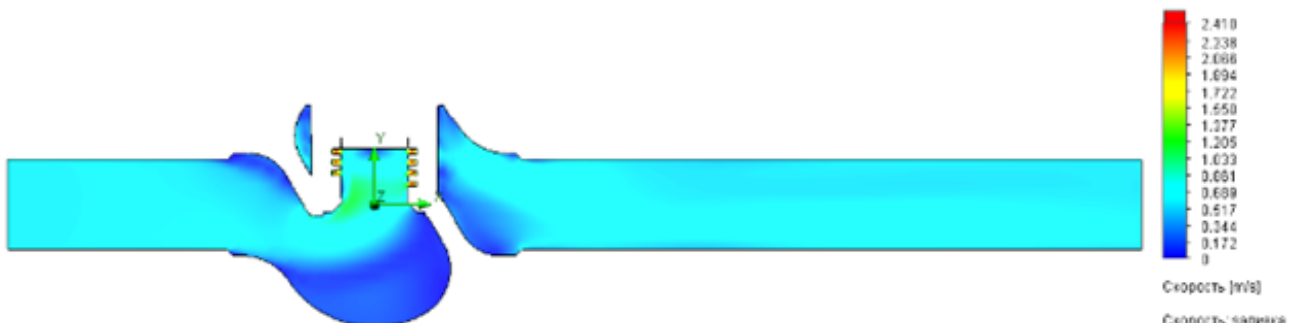
В соответствии с методикой, приведенной в ГОСТ 34437–2018 «Арматура трубопроводная. Методика экспериментального определения гидравлических и кавитационных характеристик», определялись параметры расхода,

давления и перепада давления с последующим расчетом пропускной способности и предварительным расчетом числа Рейнольдса:

$$K_v = \frac{3,57 \cdot 10^4 \cdot Q}{B} \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{\Delta P}},$$

где  $K_v$  – пропускная способность арматуры, м<sup>3</sup>/ч;  $Q$  – объемный расход, м<sup>3</sup>/с;  $\rho_1$  – плотность газа при параметрах до арматуры, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta P$  – перепад (потери) давления на арматуре, Па [16–18].

Далее приведены результаты моделирования течения среды через клапан при степени открытия клапана 100 % (рис. 5). Значение пропускной способности при 100 % открытии регулирующего органа клапана составляет 164,5 м<sup>3</sup>/ч.



а

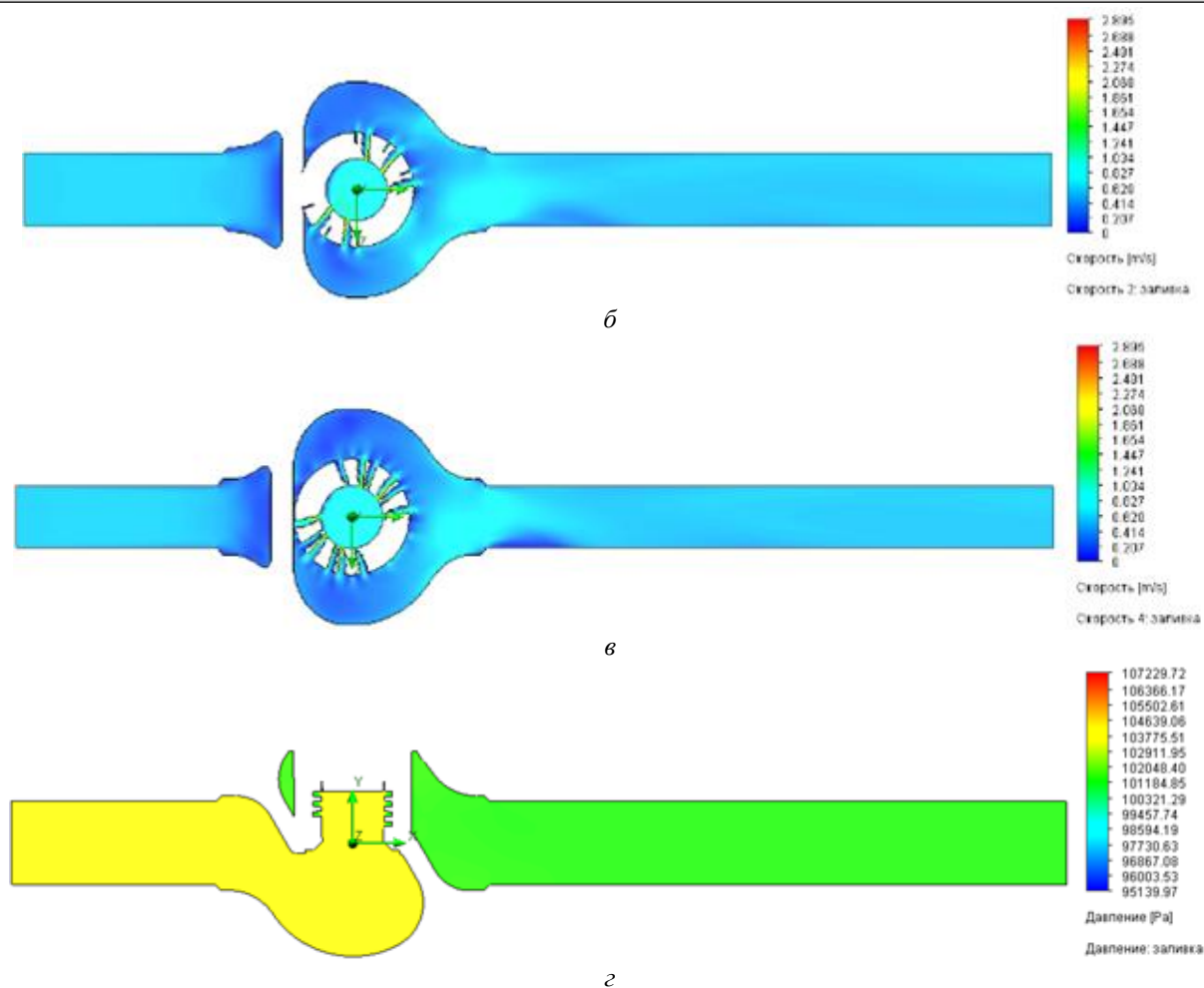


Рис. 5. Поле скорости:

*a* – в основном сечении; *б* – в сечении клетки 1; *в* – в сечении клетки 2; *г* – поле давления в основном сечении

Fig. 5. Velocity field:

*a* – in the main section; *b* – in the cell section 1; *c* – in the cell section 2; *d* – pressure field in the main section

### Обсуждение результатов

Рассмотрим значения пропускной способности клапана ( $K_V$ ) при других степенях открытия клапана, а также график пропускной характеристики (рис. 6).

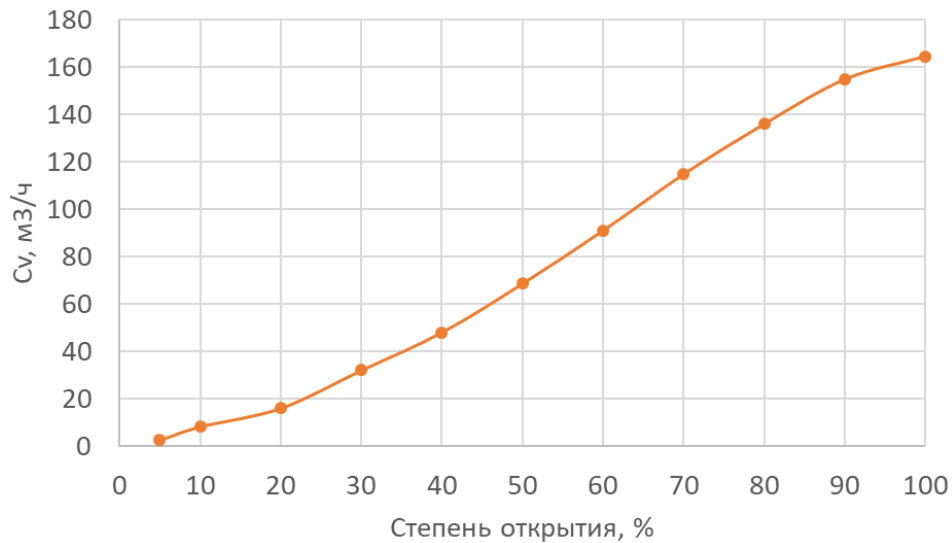
График (см. рис. 6) показывает значения пропускной способности ( $K_V$ ) для клапана при различных степенях его открытия в процентах. Если клапан открыт на 40 %, то его пропускная способность ( $K_V$ ) составляет 48 м<sup>3</sup>/ч. Если клапан полностью открыт, то его пропускная способность ( $K_V$ ) составляет 164,5 м<sup>3</sup>/ч.

Испытания проводились на стенде (рис. 7). Схема стенда включает следующие компоненты: 1, 2 – лабораторные вентиляторы; 3 – расходомерное устройство; 4 – испытуемый клапан.

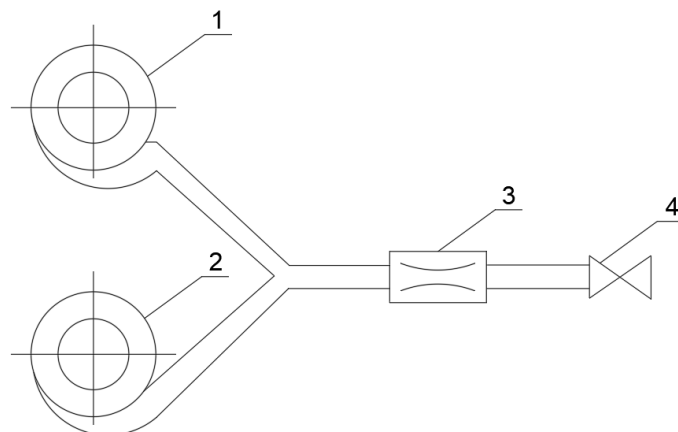
Далее приведены значения  $K_V$  (рис. 8), полученные в результате пролива клапана, регулируемого на испытательном стенде. Данное испытание проводится с целью обеспечения заданной долговечности трубопроводной арматуры при воздействии внутренних и внешних сил и показывает долговечность трубопроводной арматуры.

Для подтверждения полученных результатов в ходе теоретического моделирования конечно-элементным методом рассмотрена корреляция значений эксперимента. На рис. 9 приведен график сравнения теоретического анализа и проведенного эксперимента.

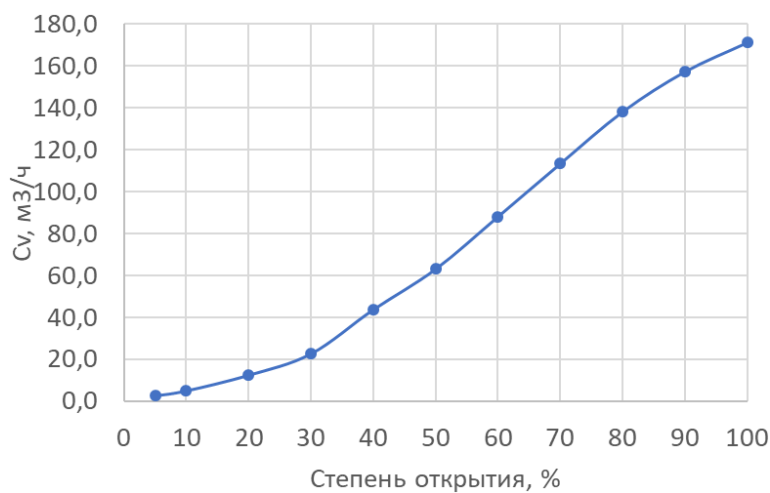
Для иллюстрации степени отклонения данных КЭ анализа и эксперимента были получены значения, которые приведены на графике (рис. 10).



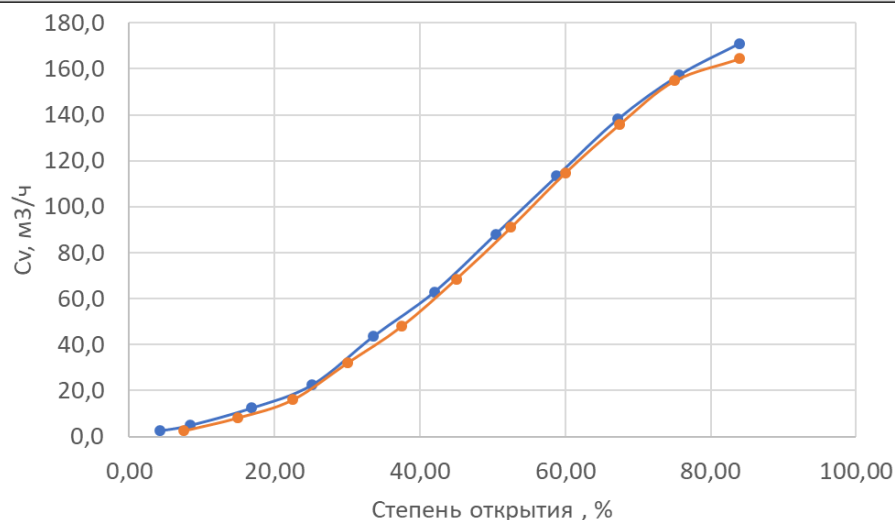
**Рис. 6.** Пропускная характеристика клапана, полученная по результатам конечно-элементного моделирования  
**Fig. 6.** The flow characteristic of the valve obtained from the results of the finite element simulation



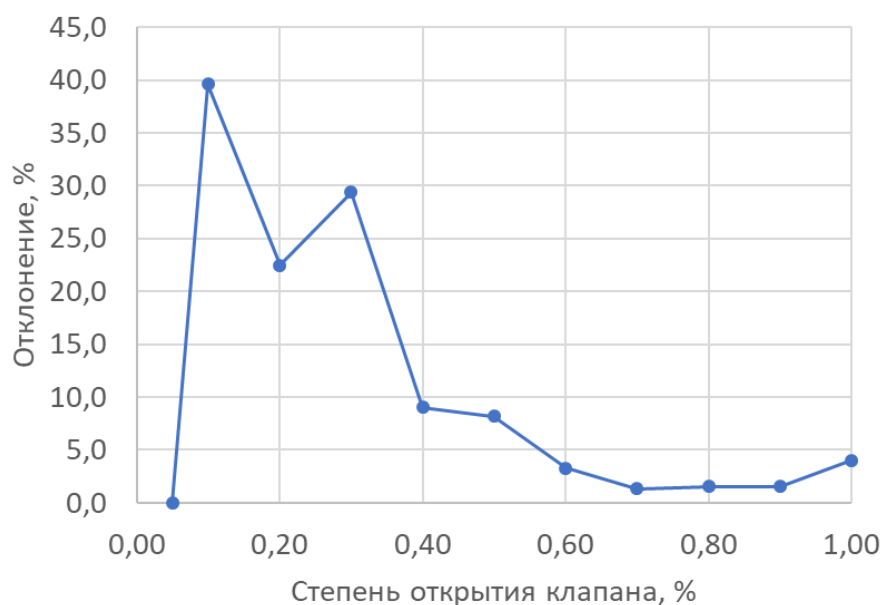
**Рис. 7.** Схема испытательного стенда  
**Fig. 7.** Test bench diagram



**Рис. 8.** Экспериментальная пропускная характеристика клапана  
**Fig. 8.** Experimental flow characteristics of the valve



**Рис. 9.** Сравнение результатов конечно-элементного анализа и экспериментальных данных  
**Fig. 9.** Comparison of the results of the finite element method analysis and experimental data



**Рис. 10.** График отклонения полученных результатов  
**Fig. 10.** Graph of deviation of the results obtained

### Заключение

В ходе проведенного исследования сделан вывод о том, что присутствует незначительное отклонение итогов КЭ анализа от результатов, полученных на испытательном стенде при степенях открытия клапана на участке 40–100 %.

На начальном этапе 0–40 % наблюдается отклонение значений в пределах 22–39 % ввиду сложности проведения анализа при низкой степени открытия клапана. По результатам расчетов и испытаний видно, что КЭ анализ необходимо и важно использовать при проектировании клапа-

нов на различных стадиях производства для снижения общих издержек. Имея в наличии необходимые вычислительные мощности, можно производить оптимизацию или модернизацию конструкции клапанов в зависимости от расчетных данных, получаемых на определенных итерациях расчетов с переработанным конструктивом.

В перспективе будут предприняты попытки для решения проблем с корреляцией результатов на участке 0–40 % при использовании инструментов математического моделирования.

Предложения по практическому применению результатов работы заключаются в их

использовании в проектировании объектов атомной и нефтегазовой промышленности. В научной работе указаны полученные расчетные и экспериментальные значения пропускной способности, а также дана оценка возможности использования КЭ анализа при выполнении проектирования клапанов.

### Список литературы

1. Белобородов А.В., Сызранцева К.В. Использование метода конечных элементов для оценки прочностной надежности нефтегазового оборудования // Проблемы развития ТЭК Западной Сибири на современном этапе : тр. междунар. науч.-техн. конф. Тюмень, 2003. С.94–97.
2. Transient Simulation and Experiment Validation on the Opening and Closing Process of a Ball Valve used in Nuclear Power Plant / Y. Han, L. Zhou, L. Bai et al. // Nuclear Engineering and Technology. 2022. Vol. 54. Iss. 5. P. 1674–1865. DOI 10.1016/j.net.2021.10.035.
3. Корнев Е.С., Павлова Л.Д. Применение программных средств конечно-элементного анализа для решения трехмерных задач горной геомеханики // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2015. № 2. С. 126–129.
4. Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В., Белобородов А.В. Использование метода конечных элементов для анализа конструкций трубопроводной арматуры // Нефть и газ : проблемы недропользования, добычи и транспортировки : материалы науч.-техн. конф. Тюмень, 2002. С. 130.
5. Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V., Beloborodov A.V. Using Finite Element Analyzing for calculation of stress-strain conditions of wedge gate valves bodies // Engineering Mechanics 2003: book of extended abstracts of National conference with international participation. Prague : Czech Republic, 2003. P. 324–325. URL : <https://www.engmech.cz/improc/2003/113-Vladimir-Syzrantsev-PT.pdf> (Accessed August 3, 2023).
6. Теоретический метод управления расходом перекачиваемой среды по положению запирающих элементов трубопроводной арматуры / А.С. Кравчук, А.И. Кравчук, А.П. Михиевич и др. // Мир транспорта. 2020. Т. 18. № 2 (87). С. 22–49.
7. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М. : Мир, 1975. 541 с.
8. Бате К.Д., Вилсон Е.Л. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М. : Стройиздат, 1982. 447 с.
9. Кассирова Д.М. Исследование явления автоколебания струи на выходе из воздухораспределителя с помощью программы STAR-CD // Сб. тр. второй конф. пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBH. М., 2002. С. 10–12.
10. Кузнецов Е.Г., Шмелев В.В. Моделирование течения в клапане обратном подъемном DN50 PN16 и определение его гидравлических характеристик // Арматуростроение. 2007. № 1 (46). С. 44–49.
11. Tahry S.H. El. k-epsilon equation for compressible engine flows // Journal of Energy. 1983. Vol. 7, Iss. 4. P. 345–353.
12. Мойзес Б.Б., Плотнокова И.В., Редько Л.А. Статистические методы контроля качества и обработка экспериментальных данных. Томск : ТПУ, 2016. 119 с.
13. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М. : Физматлит, 2008. 364 с.
14. Zavyalov A., Zhuchkov K., Vasilchenko M. Process Pipeline Strength Calculation Methodology Enhancement Using Finite-Element Method // Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. 2023. Vol. 14. Iss. 2. DOI 10.1061/JPSEA2.PSENG-1401.
15. Чопоров С.В., Гоменюк С.И., Лисняк А.А. Сравнительный анализ треугольных и четырехугольных конечных элементов // Вестн. Херсон. нац. техн. ун-та. 2013. № 2 (47). С. 382–386.
16. ГОСТ 34437-2018. Арматура трубопроводная. Методика экспериментального определения гидравлических и кавитационных характеристик. Введ. 2019–07–01. М. : Стандартинформ, 2018. 41 с.
17. Котельников Л.В. Моделирование потока проводимой среды в регулирующем устройстве // Вестн. Курган. гос. с.-х. акад. 2017. № 4 (24). С. 80–82.
18. Стохастическая модель процесса образования кавитационных пузырей в проточной части регулирующего клапана / А.Б. Капранова, А.Е. Лебедев, А.М. Мельцер и др. // Вестн. Иванов. гос. энергетич. ун-та. 2016. № 4. С. 24–29.

### References

1. Beloborodov A.V., Syzrantseva K.V. Ispol'zovanie metoda konechnykh elementov dlya otsenki prochnostnoi nadezhnosti neftegazovogo oborudovaniya [Using the finite element method to assess the strength reliability of oil and gas equipment]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Problemy razvitiya TEK Zapadnoi Sibiri na sovremennom etape»* [Proceedings of the international scientific and technical conference «Problems of the development of the fuel and energy complex of Western Siberia at the present stage»]. Tyumen', 2003, pp. 94–97.
2. Han Y., Zhou L., Bai L., Xue P., Lv W., Shi W., Huang G. Transient Simulation and Experiment Validation on the Opening and Closing Process of a Ball Valve used in Nuclear Power Plant. *Nuclear Engineering and Technology*, 2022, vol. 54, iss. 5, pp. 1674–1865.
3. Kornev E.S., Pavlova L.D. Primenenie programmnykh sredstv konechno-elementnogo analiza dlya resheniya trekhmernykh zadach gornoi geomekhaniki [Application of software tools of finite element analysis for solving three-dimensional problems of mining geomechanics]. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov* [High-tech technologies for the development and use of mineral resources], 2015, no. 2, pp. 126–129.
4. Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V., Beloborodov A.V. Ispol'zovanie metoda konechnykh elementov dlya analiza konstruktivnykh truboprovodnoi armatury [The use of the finite element method for the analysis of pipeline valve structures].



*Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Nef't i gaz: problemy nedropol'zovaniya, dobychi i transportirovki»* [Proceedings of the Scientific and Technical Conference «Oil and gas: problems of subsurface use, production and transportation»]. Tyumen', 2002, p. 130.

5. Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V., Beloborodov A.V. Using Finite Element Analyzing for calculation of stress-strain conditions of wedge gate valves bodies. *Engineering Mechanics 2003: book of extended abstracts of National conference with international participation. Prague : Czech Republic, 2003*, pp. 324–325. URL : <https://www.engmech.cz/improc/2003/113-Vladimir-Syzrantsev-PT.pdf> (Accessed August 3, 2023).

6. Kravchuk A.S., Kravchuk A.I., Mikhievich A.P., Gais N.Yu. Teoreticheskii metod upravleniya raskhodom perekachivaemoi sredy po polozeniyu zapirayushchikh elementov truboprovodnoi armatury [Theoretical Method for Controlling the Flow Rate of the Pumped Medium by Positioning Locking Elements of the Pipe Fittings]. *Mir transporta* [World of Transport], 2020, vol. 18, no. 2 (87), pp. 22–49.

7. Zienkiewicz O. Metod konechnykh elementov v tekhnike [The finite element method in engineering science]. Moscow: Mir Publ., 1975. 541 p.

8. Bathe K.-J., Wilson E.L. Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov [Numerical methods in finite element analysis]. Moscow: Stroiizdat Publ., 1982. 447 p.

9. Kassirova D.M. Issledovanie yavleniya avtokolebaniya strui na vykhode iz vozdukhoraspredelatelya s pomoshch'yu programmy STAR-CD [Investigation of the phenomenon of self-oscillation of the jet at the outlet of the air distributor using the STAR-CD program]. *Sbornik trudov vtoroi konferentsii pol'zovatelei programmnogo obespecheniya CAD-FEM GMBH* [Proceedings of the Second Conference of CAD-FEM GMBH Software Users], Moscow, 2002, pp. 10–12.

10. Kuznetsov E.G., Shmelev V.V. Modelirovanie techeniya v klapane obratnom pod'emnom DN50 PN16 i opredelenie ego gidravlicheskiykh kharakteristik [Flow modeling in a DN50 PN16 reverse lifting valve and determination of its hydraulic characteristics]. *Armaturostroenie* [Armature construction], 2007, no. 1, pp. 44–49.

11. Tahry S.H. El. k-epsilon equation for compressible engine flows. *Journal of Energy*, 1983, vol. 7, iss. 4, pp. 345–353.

12. Moizes B.B., Plotnikova I.V., Red'ko L.A. Statisticheskie metody kontrolya kachestva i obrabotka eksperimental'nykh dannykh [Statistical methods of quality control and experimental data processing]. Tomsk: TPU Publ., 2016. 118 p.

13. Volkov K.N., Emel'yanov V.N. Modelirovanie krupnykh vikhrei v raschetakh turbulentykh techenii [Modeling of large vortices in calculations of turbulent flows]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2008. 364 p.

14. Zavyalov A., Zhuchkov K., Vasilchenko M. Process Pipeline Strength Calculation Methodology Enhancement Using Finite-Element Method. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2023, vol. 14, iss. 2. DOI 10.1061/JPSEA2.PSENG-1401.

15. Choporov S.V., Gomenyuk S.I., Lisnyak A.A. Sravnitel'nyi analiz treugol'nykh i chetyrekhugol'nykh konechnykh elementov [Comparative analysis of triangular and quadrangular finite elements]. *Vestnik Khersonskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kherson National Technical University], 2013, no. 2 (47), pp. 382–386.

16. GOST 34437-2018. Armatura truboprovodnaya. Metodika eksperimental'nogo opredeleniya gidravlicheskiykh i kavitatsionnykh kharakteristik [State Standard 34437-2018. Pipeline valves. Technique of the experimental determination of hydraulic and cavitation characteristics]. Moscow: Standartinform Publ., 2018. 41 p.

17. Kotel'nikov L.V. Modelirovanie potoka provodimoi sredy v reguliruyushchem ustroystve [Modeling of the flow of the conducted medium in a regulating device]. *Vestnik Kurganskoi GSKhA* [Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy], 2017, no. 4 (24), pp. 80–82.

18. Kapranova A.B., Lebedev A.E., Meltzer A.M., Neklyudov S.V. Stokhasticheskaya model' protsessa obrazovaniya kavitatsionnykh puzyrej v protochnoi chasti reguliruyushchego klapana [Stochastic model of the process of formation of cavitation bubbles in the flow part of the control valve]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Ivanovo State Energy University], 2016, no. 4, pp. 24–29.

### Информация об авторах

**Буданов Вадим Андреевич**, аспирант кафедры промышленных технологий, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород; e-mail: s196697@std.novsu.ru.

**Петров Николай Викторович**, аспирант кафедры промышленных технологий, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород; e-mail: s225953@std.novsu.ru.

**Нозирзода Шодмон Салохидин**, аспирант кафедры промышленных технологий, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород; e-mail: shoni\_1997@mail.ru.

**Петрова Екатерина Дмитриевна**, аспирантка кафедры промышленных технологий, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород; e-mail: petrowa.ket@yandex.ru.

### Information about the authors

**Vadim A. Budanov**, Ph.D. Student of the Department of Industrial Technologies, Yaroslavl the Wise Novgorod State University, Velikii Novgorod; e-mail: s196697@std.novsu.ru.

**Nikolai V. Petrov**, Ph.D. Student of the Department of Industrial Technologies, Yaroslavl the Wise Novgorod State University, Velikii Novgorod; e-mail: s225953@std.novsu.ru.

**Shodmon S. Nozirzoda**, Ph.D. Student of the Department of Industrial Technologies, Yaroslavl the Wise Novgorod State University, Velikii Novgorod; e-mail: shoni\_1997@mail.ru.

**Ekaterina D. Petrova**, Ph. D. Student of the Department of Industrial Technologies, Yaroslavl the Wise Novgorod State University, Velikii Novgorod; e-mail: petrowa.ket@yandex.ru.