

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИГОЛЬЧАТОГО ДРОССЕЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

Д.Ф. Хабарова, khabarovadf@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0251-0138>

С.Б. Школин, shkolinsb@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4144-9713>

С.Ю. Битюцких, bitiutckikhsi@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4583-2903>

А.О. Шульц, shultcao@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8758-1738>

Д.В. Куплевацкий, shultcao@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8758-1738>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Статья посвящена разработке геометрии проточной части квадратичного дросселя с игольчатым запорно-регулирующим элементом с применением средств вычислительной гидродинамики. В работе приведены результаты расчета основных геометрических параметров проточной части дросселя при заданных номинальном массовом расходе и рабочем диапазоне хода иглы. Показано, что результаты расчета пропускной характеристики квадратичного дросселя существенно зависят от рекомендаций по выбору величин коэффициентов гидравлического сопротивления его проточной части. Поэтому для выбора геометрических параметров проточной части дросселя целесообразно проведение численного моделирования течения жидкости в нем.

В статье представлены параметры и результаты моделирования течения жидкости в проточной части игольчатого дросселя в двух исполнениях при различных положениях запорно-регулирующего элемента. По результатам моделирования определены пропускные характеристики обоих исполнений дросселя и обоснован выбор оптимального с точки зрения линейности пропускной характеристики и ширины диапазона регулирования по расходу исполнения дросселя. Кроме того, по результатам численного моделирования определена величина силы, действующей на запорно-регулирующий элемент, со стороны жидкости в каждом исследуемом положении иглы. Также получены поля распределения скоростей и статического давления в продольном сечении проточной части дросселя, которые позволяют оценить гидродинамическую картину течения жидкости и наличие дополнительных нежелательных сопротивлений в проточной части, а также возможность кavitационных эффектов в рабочем диапазоне массовых расходов.

Исследуемый дроссель был изготовлен и подвергнут экспериментальному исследованию для определения действительной пропускной характеристики аппарата. Результаты эксперимента показали, что расхождение действительной пропускной характеристики и характеристики, полученной в результате численного моделирования, не превышает 5 % во всем рабочем диапазоне хода запорно-регулирующего элемента.

Ключевые слова: дроссель, численное моделирование, экспериментальное исследование, пропускная характеристика, гидродинамическая сила

Благодарности. Работа выполнена за счет средств Гранта Министерства образования и науки Челябинской области от 25.12.2023 № 30-2023-010039 (договор 2023525).

Для цитирования: Проектирование игольчатого дросселя с применением средств вычислительной гидродинамики / Д.Ф. Хабарова, С.Б. Школин, С.Ю. Битюцких и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2024. Т. 24, № 4. С. 154–165. DOI: 10.14529/engin240412

DESIGN OF A NEEDLE THROTTLE VALVE USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

D.F. Khabarova, khabarovadf@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0251-0138>

S.B. Shkolin, shkolin sb@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4144-9713>

S.Yu. Bityutskikh, bityutckikh si@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4583-2903>

A.O. Shults, shultcao@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8758-1738>

D.V. Kuplevatskiy, shultcao@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8758-1738>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article is devoted to the development of the geometry of the flow part of a quadratic throttle with a needle shut-off and control element using computational fluid dynamics. The paper presents the results of calculating the main geometric parameters of the flow part of the throttle for a given nominal mass flow rate and operating range of the needle stroke. It is shown that the results of calculating the flow characteristic of a quadratic throttle significantly depend on the recommendations for choosing the values of the hydraulic resistance coefficients of its flow part. Therefore, to select the geometric parameters of the flow part of the throttle, it is advisable to carry out numerical modeling of the fluid flow in it. The article presents the parameters and results of modeling the fluid flow in the flow part of a needle throttle in two versions at different positions of the shut-off and control element. Based on the modeling results, the flow characteristics of both throttle versions are determined and the choice of the optimal throttle version in terms of linearity of the flow characteristic and the width of the flow control range is substantiated. In addition, based on the results of numerical modeling, the magnitude of the force acting on the shut-off and control element from the liquid side in each studied position of the needle was determined. Also, the fields of velocity distribution and static pressure in the longitudinal section of the flow part of the throttle were obtained, which allow us to estimate the hydrodynamic picture of the liquid flow and the presence of additional undesirable resistances in the flow part, as well as the possibility of receipt effects in the working range of mass flows. The throttle under study was manufactured and subjected to an experimental study to determine the actual flow characteristic of the device. The experimental results showed that the discrepancy between the actual flow characteristic and the characteristics obtained as a result of numerical modeling does not exceed 5 % in the entire working range of the shut-off and control element.

Keywords: throttle valve, numerical simulation, experimental study, flow characteristic, flow force

Acknowledgments: The study was carried out using funds from the Grant of the Ministry of Education and Science of the Chelyabinsk Region dated 12/25/2023 No. 30-2023-010039 (agreement 2023525).

For citation: Khabarova D.F., Shkolin S.B., Bityutskikh S.Yu., Shults A.O., Kuplevatskiy D.V. Design of a needle throttle valve using computational fluid dynamics. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2024;24(4):154–165. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin240412

Введение

В настоящее время средства вычислительной гидродинамики широко применяются при исследовании, разработке и проектировании гидравлических аппаратов. CFD-моделирование применяется для оптимизации конструкции клапанов с точки зрения отсутствия кавитации [1–4], достижения заданных рабочих характеристик [5–10]. Кроме того, численное моделирование течения жидкости в проточной части гидроаппарата позволяет, например, оценить величину гидродинамической силы, действующей на запорно-регулирующий элемент клапана [11–13], исследовать методы снижения ее величины [14–16], а также получить статические и динамические характеристики гидроаппарата [17–19] на этапе эскизного проекта. При этом, как правило, на начальном этапе проектирования проточная часть аппаратов разрабатывается в соответствии с инженерными методиками расчета и затем совершенствуется посредством изучения гидродинамики потоков.

Данная работа посвящена разработке оптимальной конструкции игольчатого дросселя с точки зрения получения заданной пропускной характеристики и гидродинамической картины течения в проточной части клапана с определением сил, действующих на запорно-регулирующий элемент со стороны потока посредством численного моделирования течения жидкости в проточной части дросселя.

Численное моделирование течения жидкости в проточной части разрабатываемого дросселя позволит подобрать оптимальную конфигурацию проточной части, оценить нагруженность привода перемещения запорно-регулирующего элемента, а также проанализировать гидродинамическую картину течения жидкости в проточной части дросселя и при необходимости модифицировать конфигурацию иглы и седла.

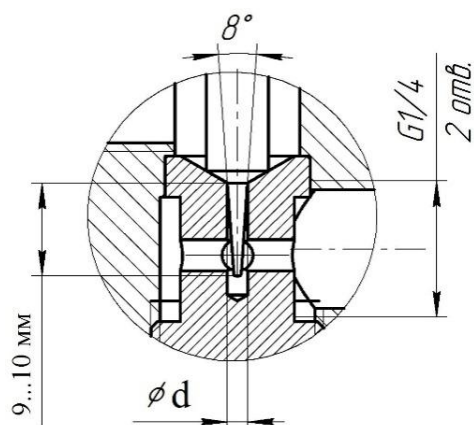


Рис. 1. Элемент проточной части исследуемого дросселя

Fig. 1. Element of the flow part of the throttle

Верификация параметров моделирования и проверка адекватности подхода по выбору оптимальной конфигурации проточной части производится путем экспериментального исследования разработанного дросселя с получением его действительной пропускной характеристики.

Объект исследования

Объектом исследования является игольчатый дроссель, основные размеры проточной части показаны на рис. 1. Данный аппарат был разработан в рамках проводимого исследования при следующих исходных параметрах: рабочая жидкость – водный раствор спирта 95 %, давление питания не более $p_{пит} = 2$ МПа, номинальный расход рабочей среды при перепаде давлений на дросселе $\Delta p_{др} = 0,1$ МПа составляет $m = 40$ г/с. К характеристикам клапана предъявляются следующие требования: пропускная характеристика линейная, локальные скорости жидкости в рабочем диапазоне расходов не превышают 1,5 м/с.

Материалы и методы

Для предварительного определения диаметра проходного сечения дросселя используется уравнение Торричелли [20, 21]:

$$Q = \mu A_{др} \sqrt{\frac{2\Delta p_{др}}{\rho}}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент расхода, для игольчатого дросселя составляет 0,75...0,80 [20–25]; $A_{др}$ – диаметр проходного сечения дросселя (отверстия).

Угол конусности определялся по максимальному ходу запорно-регулирующего элемента согласно рекомендациям [20–25], который в данном исследовании был задан в диапазоне 9...10 мм, 70 % из которого является рабочим.

Результаты расчета по уравнению (1), а также углы конусности иглы представлены в табл. 1.

Таблица 1
Предварительные размеры игольчатого дросселя
Table 1
Preliminary dimensions of the needle throttle

Исполнение иглы	Диаметр отверстия, мм	Угол конусности, град
01	3	8
02	3,5	8

Зная диаметр условного прохода и угол конусности иглы, можно рассчитать пропускную характеристику дросселя, отражающую зависимость расхода через дроссель от хода иглы. Существенной проблемой при расчете такой характеристики для квадратичного дросселя является неопределенность значения коэффициентов местных сопротивлений его проточной части.

Таким образом, результаты предварительного расчета параметров дросселя показали, что по заданным характеристикам возможно два исполнения дросселя. Для определения оптимального соотношения геометрических параметров проточной части и, следовательно, рекомендуемого к изготовлению исполнения дросселя необходимо провести сравнительный анализ пропускных характеристик двух исполнений.

Существует две основные методики расчета коэффициента местного сопротивления дросселя. Первая основана на уравнении Торричелли (1) с учетом рекомендаций по величине коэффициента расхода [20–25]. Вторая методика, описанная в [27], предполагает расчет коэффициента местного сопротивления в зависимости от скорости жидкости итерационным методом. Рассчитанные пропускные характеристики дросселя по этим методикам для каждого из двух исполнений показаны на рис. 2. Как видно, расчетная величина расхода рабочей жидкости через дроссель в каждом положении иглы существенно зависит от выбранной величины гидравлического сопротивления, то есть от выбранной для расчета методики. Поэтому необходимо провести численное моделирование течения жидкости в проточной части дросселя.

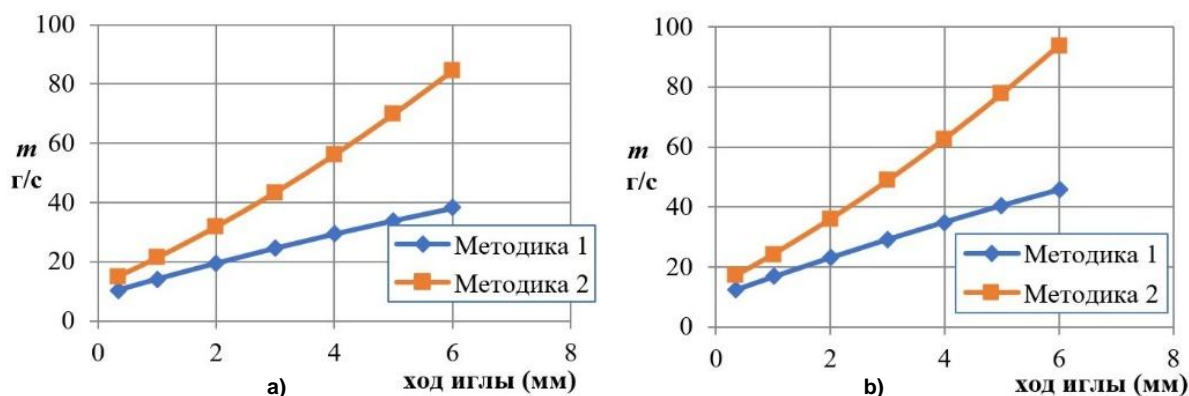


Рис. 2. Расчетные пропускные характеристики дросселя: а) исполнение 01; б) исполнение 02

Fig. 2 Calculated flow characteristics of the throttle: a) version 01; b) version 02

Моделирование течения жидкости в проточной части дросселя выполнено в программном модуле AnsysFluent, позволяющем получить пространственную картину течения воды внутри испытуемой арматуры и определить её интегральные характеристики.

Обработка геометрических моделей выполнялась в программном модуле AnsysDesign Modeler, сеточных моделей – в модуле AnsysMeshing. На основании геометрических моделей дросселя была определена и построена область течения внутри клапана.

Модель проточной части дросселя выполнена в трехмерном варианте. Изображение модели представлено на рис. 3.

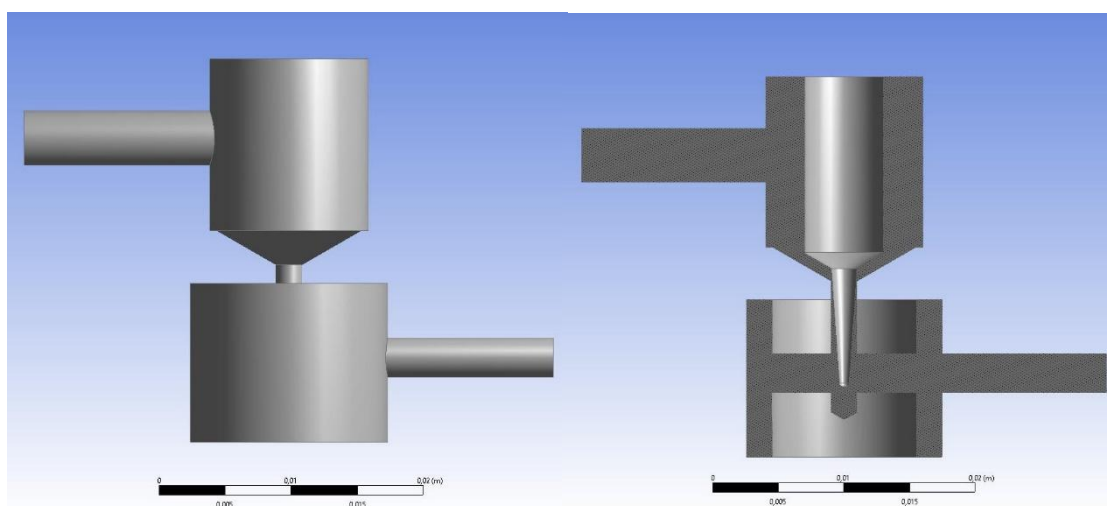


Рис. 3. Элемент проточной части исследуемого дросселя (исполнение 1)

Fig. 3. Element of the flow part of the throttle under study (version 1)

Расчетная область течения была разбита на конечно-объемную расчётную сетку. Сетка – гибридная, состоит из многоугольников и тетраэдров во внутренних областях течения и 7 призматических слоев в пристеночной области течения. Для создания сетки использовалась расширенная размерная функция элементов – ProximityandCurvature, которая позволяет локально уточнить плотность сетки и задать нужное количество элементов.

Для расчета была использована модель турбулентности k-ε Realizable. Согласно представленной геометрической модели исследуемого дросселя, была создана конечно-элементная расчетная сетка, представлена на рис. 4. При построении расчетной сетки использовался препроцессор AnsysMeshing.

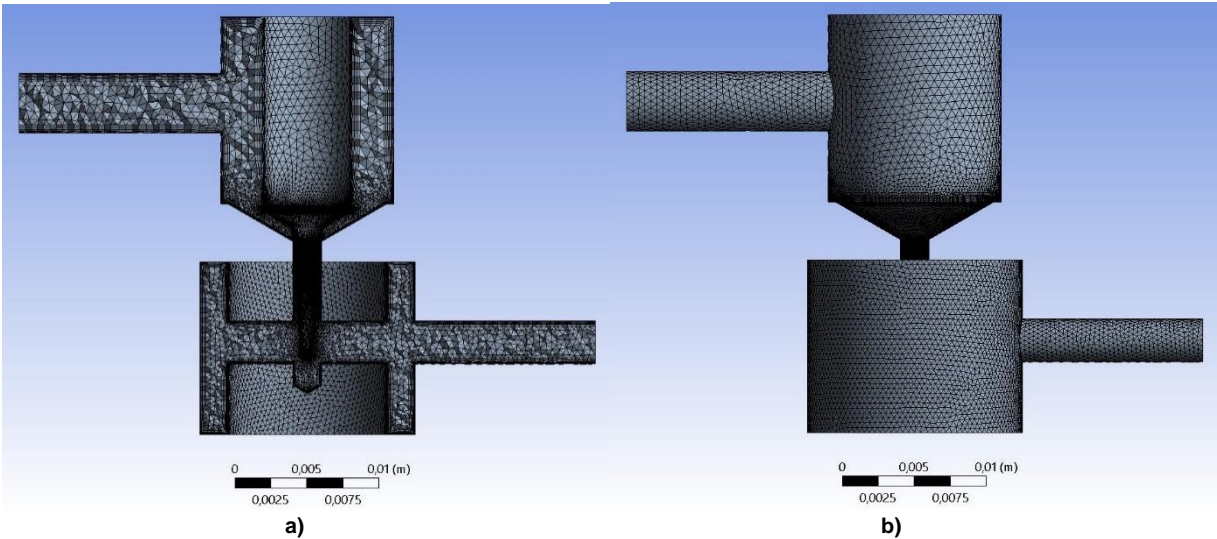


Рис. 4. Расчетная сетка конечно-элементной модели (исполнение 1)
Fig. 4. Mesh of the finite element model (version 1)

В качестве рабочей среды принята жидкость – спирт этиловый 95 %. Значения основных свойств рабочей среды указаны в табл. 2. Граничные условия для исследуемых случаев приведены в табл. 3.

Таблица 2 Свойства рабочей среды Table 2 Properties of the working fluid	
Наименование параметра	Значение
Плотность, ρ	790 кг/м³
Коэффициент динамической вязкости, μ	0,0012·кг/м·с

Таблица 3 Граничные условия Table 3 Boundary conditions	
Локация	Значения параметров
Вход в дроссель, Inlet	$p = 100000$ Па
Выход из дросселя, Outlet	$p = 0$ Па
На стенке трубы, Wall	$u = 0$ м/с стенки гидравлически гладкие

Расчет проводился в стационарной постановке (Steady-State). При расчётах использовалась расширенная пристеночная функция (EnhancedWallTreatment), позволяющая с высокой точностью определить характер течения вблизи стенки, моделировать потоки с интенсивным перемешиванием и резкими локальными изменениями скорости. Алгоритм решения связки уравнения движения и неразрывности (Pressure VelocityCoupling) при решении выбирался SIMPLEC. Для получения точных решений использовалась дискретизация второго порядка точности (SecondOrderUpwind). Окончание расчета происходило при достижении решения уравнений импульса и неразрывности погрешностей 10^{-6} .

Результаты и обсуждения

Результаты расчета массового расхода через дроссель представлены в табл. 4.

По данным из табл. 4 видно, что величина силы, действующей на запорно-регулирующий элемент дросселя, не превышает 6 Н и, таким образом, можно сделать вывод о ненагруженности привода запорно-регулирующего элемента.

Результаты численного моделирования

Таблица 4

Results of numerical simulation

Table 4

Исполнение дросселя	Ход иглы дросселя, мм	Массовый расход жидкости, г/с	Сила, действующая на ЗРЭ от стороны потока, Н
01	1	8,2	4,85
	4	24,6	2,13
	7	35,8	0,98
02	1	9,5	5,89
	3	22,9	3,39
	6	41,1	1,74

На рис. 5 показаны кривые пропускных характеристик дросселя в исполнениях 01 и 02, полученных путем численного моделирования в AnsysFluent, а также линии тренда, построенные по линейному закону с указанием величины достоверности аппроксимации.

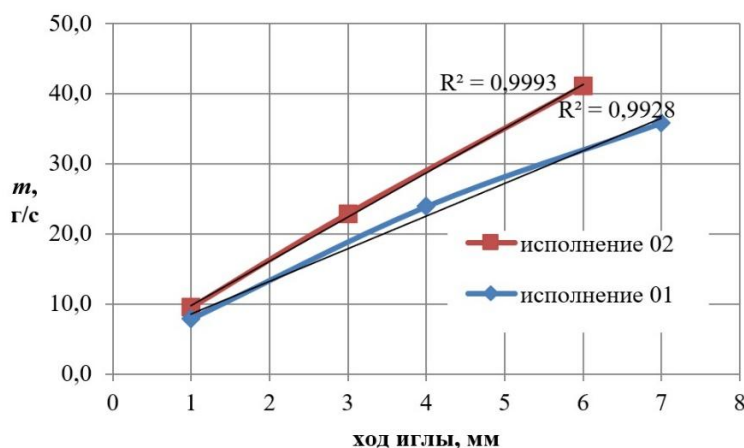


Рис. 5. Сопоставление пропускных характеристик, полученных по аналитическим методикам и по результатам численного моделирования

Fig. 5. Comparison of flow characteristics obtained using analytical methods and the results of numerical simulation

пропускной характеристики, полученная аналитическим расчетом по методике 2 [27], существенно отличается от кривой, полученной в результате численного моделирования.

Распределения давления и скорости в продольных сечениях дросселя изображены на рис. 6, 7. Как видно из рис. 6, давление жидкости проточной части во всех случаях превышает величину давления насыщенных паров спирта при заданных температурах, следовательно, возникновение очагов кавитации в местах локальных ускорений и разрежений исключается. Кроме того, из рис. 7 видно, что скорости во всех точках проточной части не превышают 1,5 м/с, что соответствует рекомендациям по проектированию гидравлической аппаратуры такого типа.

Анализ кривых на рис. 5 показывает, что наиболее перспективной является конструкция дросселя в исполнении 02 ввиду наибольшей линейности характеристик и полного охвата диапазона регулирования по расходу.

Сравнение кривых на рис. 2 и 5 показывает, что пропускная характеристика, рассчитанная по методике 1, то есть по уравнению Торричелли (1) с учетом рекомендованных в [20–26] величин коэффициента расхода, показывает удовлетворительную сходимость с кривой пропускной характеристики, полученной в результате численного моделирования потока через дроссель. При этом кривая

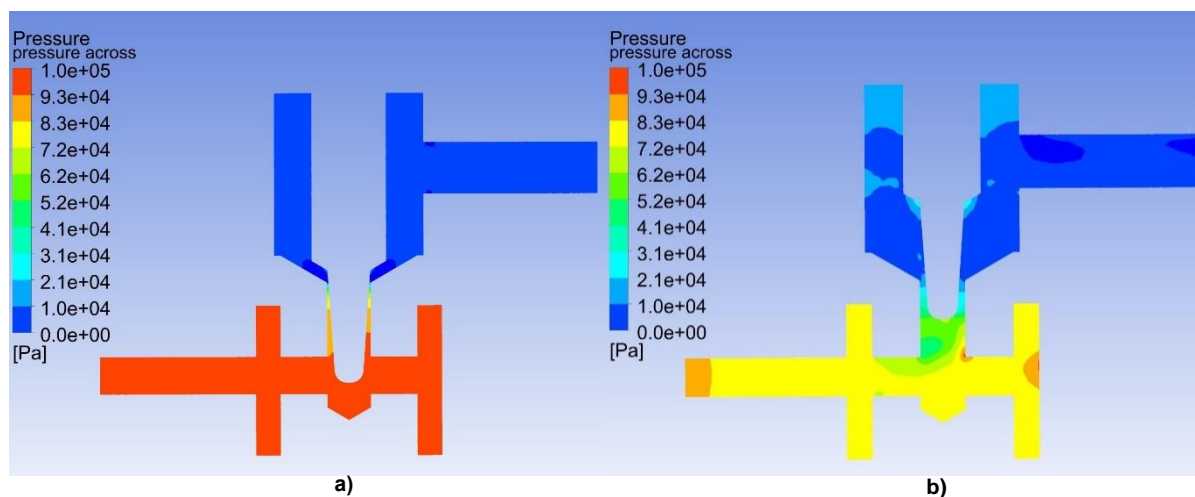


Рис. 6. Распределение давления в продольном сечении дросселя исполнения 02:
а) перемещение иглы 1 мм; б) перемещение иглы 6 мм

Fig. 6. Pressure distribution in the longitudinal section of the throttle of version 02:
а) needle movement 1 mm; б) needle movement 6 mm

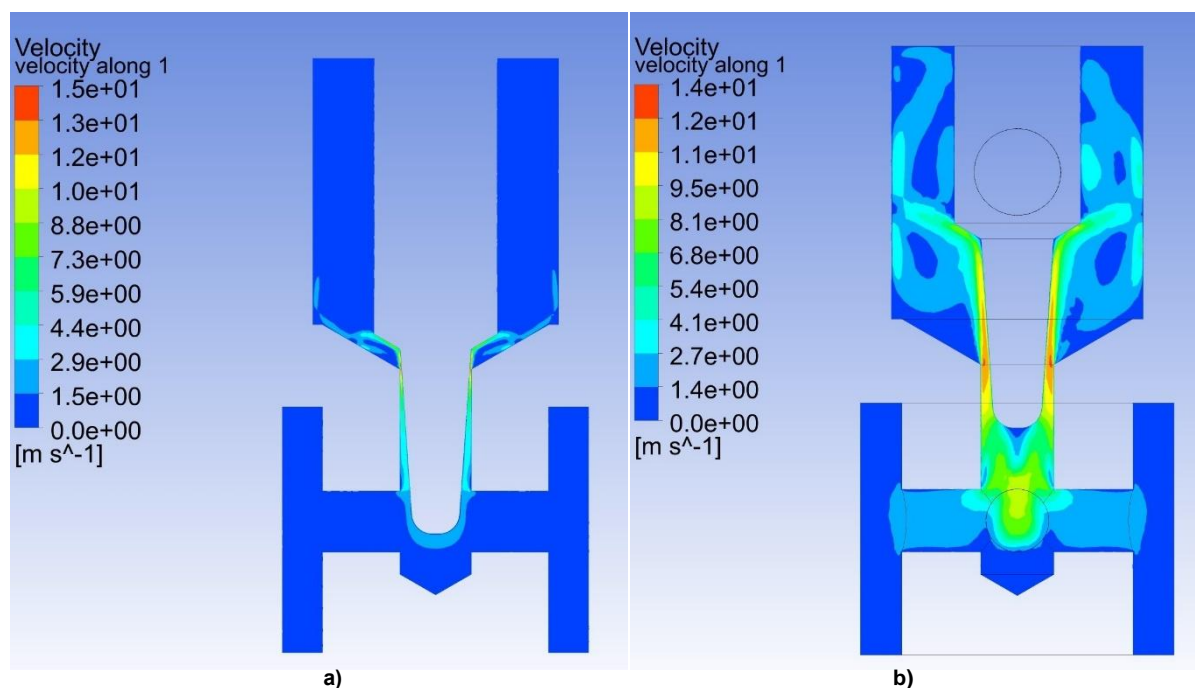


Рис. 7. Распределение скорости в продольном сечении дросселя исполнения 02:
а) перемещение иглы 1 мм; б) перемещение иглы 6 мм

Fig. 7. Velocity distribution in the longitudinal section of the throttle of version 02:
а) needle movement 1 mm; б) needle movement 6 mm

Спроектированный игольчатый дроссель в исполнении 02 был изготовлен и подвергнут гидравлическим испытаниям по методике, разработанной согласно ГОСТ 33257-2015, в результате которых получена действительная пропускная характеристика дросселя. На рис. 8 приведено сопоставление пропускных характеристик дросселя, полученных в результате численного моделирования и гидравлического испытания, в пределах относительной погрешности 5 %. Кроме того, на рис. 8 показана линейная аппроксимация экспериментальных данных с указанием величины достоверности аппроксимации, которая составляет $R = 0,9989$.

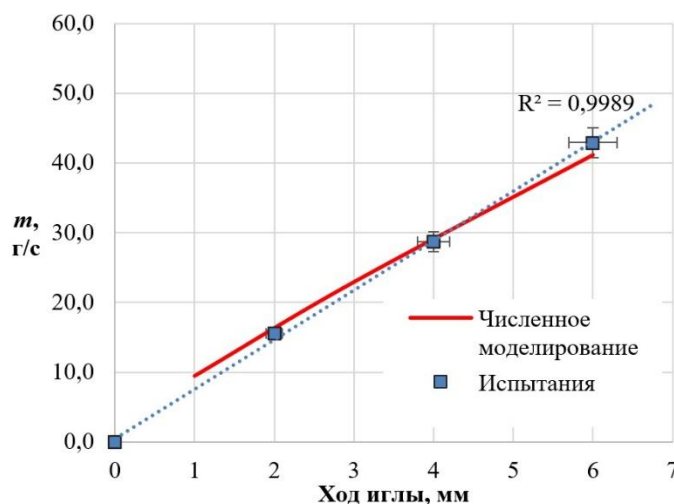


Рис. 8. Сопоставление пропускных характеристик, полученных в результате численного моделирования и экспериментальных исследований

Fig. 8. Comparison of flow characteristics obtained as a result of numerical modeling and experimental studies simulation

Как видно из рис. 8, расчетная и действительная пропускные характеристики показывают удовлетворительную сходимость. Кроме того, по линейной линии тренда, построенной по результатам испытаний, видно, что пропускная характеристика является линейной с высокой достоверностью аппроксимации в пределах рабочего диапазона хода иглы.

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

1. Расчет пропускной характеристики квадратичного дросселя по уравнению Торричелли (1) с учетом рекомендаций [20–25] по выбору величины коэффициента расхода показывает удовлетворительную сходимость с результатами численного моделирования.

2. Применение средств вычислительной гидродинамики позволяет рассчитать величину гидродинамической силы, оценить гидродинамическую картину течения жидкости в проточной части, а также выбрать оптимальные с точки зрения заданной пропускной характеристики геометрические параметры элементов проточной части дросселя.

3. Выбранные параметры моделирования течения жидкости в проточной части игольчатого дросселя позволяют рассчитать гидродинамику течения с удовлетворительной точностью, что подтверждается экспериментальными исследованиями пропускной характеристики дросселя.

Список литературы

1. Effect of the opening degree on evolution of cryogenic cavitation through a butterfly valve / G. Zhang, W.W. Wang, Z.Y. Wu, D.S. Chen, H.D. Kim, Z. Lin // Energy. 2023. Vol.283. Paper no. 128543. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128543.

2. Experimental and numerical study on characteristics of super-linear mass flow rate and asymmetric cavitation in novel rotary-baffle curved-channel electronic expansion valve for refrigerator / Y. Yang, D. Huang, R. Zhao, X. Wei // International Journal of Refrigeration. 2024. Vol. 160. P. 141–150.

3. Study of a proportional spool valve noise by means of Functional Data Analysis: Cavitation and intensity detection / L. Romagnuolo, R. De Rosa, E. Frosina, A. Senatore // Mechanical Systems and Signal Processing. 2024. Vol. 209. Paper no. 111100.

4. CFD study on the effect of various geometrical parameters of honeycomb type orifices on pressure drop and cavitation characteristics / C.R. Mali, A.W. Patwardhan, G.K. Pandey, I. Banerjee, V. Vinod // Nuclear Engineering and Design. 2020. Vol. 370. Paper no. 110880. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2020.110880.

5. Flow Analysis of a Novel, Three-Way Cartridge Flow Control Valve / E. Lisowski, G. Filo, P. Pluskowski, J. Rajda // Applied Science. 2023. Vol. 13, Issue 6. P. 3719–3735. DOI: 10.3390/app13063719.

6. Improving the position control performance of a Proportional spool valve, using a 3D CFD modeling / A. Senatore, D. Buono, E. Frosina, M. Pavanetto, I.J. Costin, M. Olivetti // Proceedings IFPE Technical Conference. 2014. Paper no. 29.2.

7. Multiphase throttling characteristic analysis and structure optimization design of throttling valve in managed pressure drilling / G.R. Wang, F. Chu, S. Tao, L. Jiang, H. Zhu // *Energy*. 2023. Vol. 262, Part B. Paper no. 125619. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125619
8. Optimization design for throttle valve of managed pressure drilling based on CFD erosion simulation and response surface methodology / G.R. Wang, F. Chu, S. Tao, L. Jiang, H. Zhu // *Wear*. 2015. Vol. 338–339. P. 114–121. DOI: 10.1016/j.wear.2015.06.001.
9. Study on flow characteristics of the cryogenic throttle valve for superfluid helium system / Q. Qu, L. Wang, H. Chen, N. Dai, P. Jia, D. Xu, L. Li // *Cryogenics*. 2024. Vol. 138. Paper no. 103797. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2024.103797.
10. A novel CFD-ANN approach for plunger valve optimization: Cost-effective performance enhancement / A.R.S. Kaak, K. Çelebioğlu, Z. Bozkuş, O. Ulucak, E. Aylı // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2024. Vol. 97. Paper no. 102589. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2024.102589.
11. Lisowski E., Czyzycki W., Rajda J. Three Dimensional CFD Analysis and Experimental Test of Flow Force Acting on the Spool of Solenoid Operated Directional Control Valve // *Energy Conversion and Management*. 2013. Vol. 70. P. 220–229. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.02.016.
12. Amirante R., Vescovo G.D., Lippolis A. Flow Forces Analysis of an Open Center Hydraulic Directional Control Valve Sliding Spool // *Energy Conversion and Management*. 2006. Vol. 47, Iss. 1. P. 114–131. DOI: 10.1016/j.enconman.2005.03.010.
13. Amirante R., Moscatelli P., Catalano L. Evaluation of the Flow Forces on a Direct (Single Stage) Proportional Valve by Means of a Computational Fluid Dynamic Analysis // *Energy Conversion and Management*. 2007. Vol. 48, Iss. 3. P. 942–953. DOI: 10.1016/j.enconman.2006.08.024.
14. Flow force research and structure improvement of cartridge valve core based on CFD method / J. Liu, R. Li, X. Ding, Q. Liu // *Heliyon*. 2022. Vol. 11, Iss. 8. e11700. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11700.
15. Structure Optimization of Conical Spool and Flow Force Compensation in a Diverged Flow Cartridge Proportional Valve / L. Tan, H. Xie, H. Chen, H. Yang // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2019. Vol. 66. P. 170–181. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2019.03.0.
16. Свойкин А.О. Уменьшение гидродинамической силы в гидрораспределителе путем модернизации деталей золотниковой пары // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2021. № 4. С. 356–368. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-04-356-368.
17. Transient characteristics simulation and flow-field analysis of high-pressure pneumatic pilot-driven on/off valve via CFD method / P. Zhang, Y. Tao, C. Yang, W. Ma, Z. Zhang // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2024. Vol. 97. Paper no. 102620. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2024.102620.
18. Wu D., Li S., Wu P. CFD simulation of dynamic characteristics of a solenoid valve for exhaust gas turbocharger system // *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 101. P. 658–665. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.06.025.
19. Lisowski E., Filo G. CFD analysis of the characteristics of a proportional flow control valve with an innovative opening shape // *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 123. P. 15–28. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.06.025.
20. Никитченко С.Л., Лаврухин П.В., Гончарова Н.В. Конструкции, расчет и использование дросселирующих устройств в объемном гидроприводе. Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО «Донской ГАУ», 2017. 23 с.
21. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.
22. Вакина В.В., Денисенко И.Д., Столяров А.Л. Машиностроительная гидравлика. Примеры расчётов. Киев: Вищагшк.: Головное изд-во, 1986. 208 с.
23. Гидравлика и гидропривод / В.Г. Гейер, В.С. Дулин, А.Г. Боруменский, А.Н. Заря. М.: Недра, 1970. 302 с.
24. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я.М. Вильнер, Я.Т. Ковалёв, Б.Б. Некрасов и др. Минск: Выш. шк., 1985. 382 с.
25. Абрамов Е.И. и др. Элементы гидропривода. Киев: Техника, 1977. 320 с.
26. Лаврухин П.В., Никитченко С.Л. Расчет объемного гидропривода: методическое пособие к курсовой работе. Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2005. 88 с.

27. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М.О. Штейнберга. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

References

1. Zhang G., Wang W.W., Wu Z.Y., Chen D.S., Kim H.D., Lin Z. Effect of the opening degree on evolution of cryogenic cavitation through a butterfly valve. *Energy*, 2023, vol. 283, paper no. 128543. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128543.
2. Yang Y., Huang D., Zhao R., Wei X. Experimental and numerical study on characteristics of super-linear mass flow rate and asymmetric cavitation in novel rotary-baffle curved-channel electronic expansion valve for refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, 2024, vol. 160, pp. 141–150.
3. Romagnuolo L., De Rosa R., Frosina E., Senatore A. Study of a proportional spool valve noise by means of Functional Data Analysis: Cavitation and intensity detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, vol. 209, paper no. 111100.
4. Mali C.R., Patwardhan A.W., Pandey G.K., Banerjee I., Vinod V. CFD study on the effect of various geometrical parameters of honeycomb type orifices on pressure drop and cavitation characteristics. *Nuclear Engineering and Design*, 2020, vol. 370, paper no. 110880. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2020.110880.
5. Lisowski E., Filo G., Pluskowski P., Rajda J. Flow Analysis of a Novel, Three-Way Cartridge Flow Control Valve. *Applied Science*, 2023, vol. 13, iss. 6, pp. 3719–3735. DOI: 10.3390/app13063719.
6. Senatore A., Buono D., Frosina E., Pavanetto M., Costin I.J., Olivetti M. Improving the position control performance of a Proportional spool valve, using a 3D CFD modeling. *Proceedings IFPE Technical Conference*, 2014, paper no. 29.2.
7. Wang G.R., Chu F., Tao S., Jiang L., Zhu H. Multiphase throttling characteristic analysis and structure optimization design of throttling valve in managed pressure drilling. *Energy*, 2023, vol. 262, part B, paper no. 125619. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125619.
8. Wang G.R., Chu F., Tao S., Jiang L., Zhu H. Optimization design for throttle valve of managed pressure drilling based on CFD erosion simulation and response surface methodology. *Wear*, 2015, vol. 338–339, pp. 114–121. DOI: 10.1016/j.wear.2015.06.001.
9. Qu Q., Wang L., Chen H., Dai N., Jia P., Xu D., Li L. Study on flow characteristics of the cryogenic throttle valve for superfluid helium system. *Cryogenics*, 2024, vol. 138, paper no. 103797. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2024.103797.
10. Kaak A.R.S., Çelebioğlu K., Bozkuş Z., Ulucak O., Ayılı E. A novel CFD-ANN approach for plunger valve optimization: Cost-effective performance enhancement. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2024, vol. 97, paper no. 102589. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2024.102589.
11. Lisowski E., Czyzycki W., Rajda J. Three Dimensional CFD Analysis and Experimental Test of Flow Force Acting on the Spool of Solenoid Operated Directional Control Valve. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 70, pp. 220–229. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.02.016.
12. Amirante R., Vescovo G.D., Lippolis A. Flow Forces Analysis of an Open Center Hydraulic Directional Control Valve Sliding Spool. *Energy Conversion and Management*, 2006, vol. 47, iss. 1, pp. 114–131. DOI: 10.1016/j.enconman.2005.03.010.
13. Amirante R., Moscatelli P., Catalano L. Evaluation of the Flow Forces on a Direct (Single Stage) Proportional Valve by Means of a Computational Fluid Dynamic Analysis. *Energy Conversion and Management*, 2007, vol. 48, iss. 3, pp. 942–953. DOI: 10.1016/j.enconman.2006.08.024.
14. Liu J., Li R., Ding X., Liu Q. Flow force research and structure improvement of cartridge valve core based on CFD method. *Heliyon*, 2022, vol. 11, iss. 8, e11700. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11700.
15. Tan L., Xie H., Chen H., Yang H. Structure Optimization of Conical Spool and Flow Force Compensation in a Diverged Flow Cartridge Proportional Valve. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2019, vol. 66, pp. 170–181. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2019.03.0.
16. Svoynkin A.O. [Reducing the Hydrodynamic Force in the Hydraulic Distributor by Modernizing the Spool Coupe Parts]. Scientific and Technical Bulletin of the Bryansk State University, 2021, no. 4, pp. 356–368. (in Russ.) DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-04-356-368.

17. Zhang P., Tao Y., Yang C., Ma W., Zhang Z. Transient characteristics simulation and flow-field analysis of high-pressure pneumatic pilot-driven on/off valve via CFD method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2024, vol. 97, paper no. 102620. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2024.102620.
18. Wu D., Li S., Wu P. CFD simulation of dynamic characteristics of a solenoid valve for exhaust gas turbocharger system. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 101, pp. 658–665. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.06.025.
19. Lisowski E., Filo G. CFD analysis of the characteristics of a proportional flow control valve with an innovative opening shape. *Energy Conversion and Management*, vol. 123, 2016, pp. 15–28. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.06.025.
20. Nikitchenko S.L., Lavrukhin P.V., Goncharova N.V. *Konstruktsii, raschet i ispol'zovanie drosseliruyushchikh ustroystv v ob'emnom gidroprivode* [Design, calculation and use of throttling devices in positive displacement hydraulic drive]. Zernograd, 2017. 23 p.
21. Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B. et al. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody* [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. 2nd ed., revised. Moscow, 1982. 423 p.
22. Vakina V.V., Denisenko I.D., Stolyarov A.L. *Mashinostroitel'naya gidravlika. Primery raschetov* [Mechanical engineering hydraulics. Examples of calculations]. Kiev, 1986. 208 p.
23. Geyer V.G., Dulin V.S., Borumenskiy A.G., Zarya A.N. *Gidravlika i gidroprivod* [Hydraulics and hydraulic drive]. Moscow, 1970. 302 p.
24. Vil'ner Ya.M., Koval'ev Ya.T., Nekrasov B.B. et al. *Spravochnoe posobie po gidravlike, gidromashinam i gidroprivodam* [Reference manual on hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. Minsk, 1985. 382 p.
25. Abramov E.I. et al. *Elementy gidroprivoda* [Elements of hydraulic drive]. Kiev, 1977. 320 p.
26. Lavrukhin P.V., Nikitchenko S.L. *Raschet ob'emnogo gidroprivoda* [Calculation of a volumetric hydraulic drive]: Methodological manual for a term paper. Zernograd, 2005. 88 p.
27. Idelchik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook of hydraulic resistances]. Ed. by M.O. Steinberg. Moscow, 1992. 672 p.

Информация об авторах

Хабарова Дарья Федоровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; khabarovadf@susu.ru

Школин Сергей Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; shkolinsb@susu.ru

Битюцких Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика и гидропневмосистемы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; bitiutckikhsi@susu.ru

Шульц Алексей Оттович, младший научный сотрудник НИЛ проблем физико-химии и газодинамики двигательных установок многофазовых ракет-носителей, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; shultcao@susu.ru

Куплевацкий Демид Владимирович, инженер НИЛ проблем физико-химии и газодинамики двигательных установок многофазовых ракет-носителей, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kuplevatskiidv@susu.ru

Information about the authors

Darya F. Khabarova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; khabarovadf@susu.ru

Sergey B. Shkolin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shkolinsb@susu.ru

Sergey Yu.Bityutskikh, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; bityutckikhsi@susu.ru

Alexey O. Shults, Junior Researcher, Research Laboratory of Problems of Physical Chemistry and Gas Dynamics of Propulsion Systems of Reusable Launch Vehicles, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shultcao@susu.ru

Demid V. Kuplevatskiy, engineer, Research Laboratory of Problems of Physical Chemistry and Gas Dynamics of Propulsion Systems of Reusable Launch Vehicles, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kuplevatskiidv@susu.ru

Статья поступила в редакцию 14.11.2024; принята к публикации 17.11.2024.

The article was submitted 14.11.2024; accepted for publication 17.11.2024.