

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД  
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ  
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ  
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING  
COMMISSIONING OF EQUIPMENT  
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 532.5:621.039.5


DOI 10.26583/gns-2023-02-06

EDN ZBQFNI

Прогнозирование результатов испытаний по определению  
коэффициента гидравлического сопротивления клапана обратного  
осесимметричного

С.А. Кузин<sup>1</sup>  , С.Б. Кравец<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>АО «Атоммашэкспорт»; Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

<sup>2</sup>ФБУ «Национально-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия  
 KuzinSergey55@mail.ru

**Аннотация.** Актуальность данной работы определена необходимостью прогнозировать результаты испытаний по определению коэффициента гидравлического сопротивления клапана обратного осесимметричного DN100-600, с рабочим давлением до 20 МПа и рабочей температурой от плюс 5<sup>0</sup>С до плюс 350<sup>0</sup>С по ТУ 6981-254-08847871-07. В данной работе предлагается снизить объем испытаний, исключив испытания для промежуточных образцов клапанов (DN 100, DN125, DN 200, DN 300, DN 500, DN 600), расположенными по DN между типовыми образцами клапанов (DN 100, DN175, DN 400), заменив испытания проведением расчетов в программном модуле ANSYS CFX расчетного комплекса ANSYS. Приведены результаты испытаний по определению коэффициента гидравлического сопротивления. Предложена оценка величины коэффициента гидравлического сопротивления и разработаны рекомендации по его определению. Экспериментальное определение гидравлических характеристик проводилось в области квадратичного сопротивления и при отсутствии кавитации (испытания проводились на воде). Для клапана обратного номинальных диаметров  $DN \leq 250$  область квадратичного сопротивления наступает при числах Рейнольдса  $Re \geq 2 \times 10^4$ . Для арматуры номинальных диаметров  $DN \geq 250$  область квадратичного сопротивления  $Re_{KB}$  определяют в процессе экспериментального определения коэффициентов сопротивления и пропускной способности. Порядок определения  $Re_{KB}$  изложен в 7.2.3 ГОСТ 55508-2013. Данные результаты испытаний на определение коэффициента гидравлического сопротивления для клапанов DN 150, DN 175, DN 400 по ТУ 6981-254-08847871-07 можно использовать при разработке программ приемочных испытаний для установления количества образцов, подвергаемых испытаниям в зависимости от конструктивных особенностей и количества исполнений клапанов обратных (DN 100, DN125, DN 200, DN 300, DN 500, DN 600), заменив испытания расчетами.

**Ключевые слова:** коэффициент гидравлического сопротивления, клапан обратный осесимметричный, число Рейнольдса, рабочее давление, рабочая температура.

**Для цитирования:** Кузин С.А., Кравец С.Б. Прогнозирование результатов испытаний по определению коэффициента гидравлического сопротивления клапана обратного осесимметричного. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):50–56. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-06>

Prediction of test results to determine the hydraulic resistance coefficient of an axially  
symmetrical check valve

Sergey A. Kuzin<sup>1</sup> , Sergey B. Kravets<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>JSC «Atommasheexport», Volgogradsk, Rostov region, Russia

<sup>2</sup>Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (SEC NRS), Moscow, Russia

**Abstract.** The urgency of the paper is determined by the necessity to predict the results of tests for determining the coefficient of hydraulic resistance of axially symmetrical check valve DN 100-600 with operating pressure

up to 20 MPa and operating temperature from plus 50°C to plus 350°C according to TS 6981-254-08847871-07. This paper suggests to reduce the volume of tests by excluding the tests for intermediate samples of valves (DN 100, DN125, DN 200, DN 300, DN 500, DN 600) situated in DN between the valve type models (DN 100, DN 175, DN 400) and replaced the tests by calculations in the programme module ANSYS CFX of the calculation complex ANSYS. The results of the tests for determining the coefficient of hydraulic resistance are given. An estimate of hydraulic resistance coefficient values is offered and recommendations for its determination are given. The experimental determination of hydraulic characteristics was carried out in the region of quadratic resistance and in absence of cavitation (the tests were done on water). The region of quadratic resistance comes at Reynolds numbers  $Re \geq 2 \times 10^4$  for check valve of nominal diameters  $DN \leq 250$ . The region of quadratic resistance  $Re_{KB}$  is determined in the process of experimental determination of drag and flow capacity factors for valves of nominal diameters  $DN \geq 250$ . The procedure of determination of  $Re_{KB}$  is described in 7.2.3 of GOST 55508-2013. These test results for determination of hydraulic resistance coefficient for valves DN 150, DN 175, DN 400 according to TU 6981-254-08847871-07 can be used when developing acceptance test programs to set the number of tested samples according to the design features and number of versions of check valves (DN 100, DN125, DN 200, DN 300, DN 500, DN 600), replacing the testing by calculation.

**Keywords:** drag coefficient, axially symmetrical check valve, Reynolds number, working pressure, working temperature.

**For citation:** Kuzin S.A., Kravets S.B. Prediction of test results to determine the hydraulic resistance coefficient of an axially symmetrical check valve. *Global nuclear safety*. 2023;13(2):50-56 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-06>

## Введение

В настоящее время в различных системах энергоблоков с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 широко используются клапаны обратные осесимметричные DN100-600, с рабочим давлением до 20 МПа и рабочей температурой от плюс 5°C до плюс 350°C по ТУ 6981-254-08847871-07. Эскиз арматуры приведен на рисунке 1.

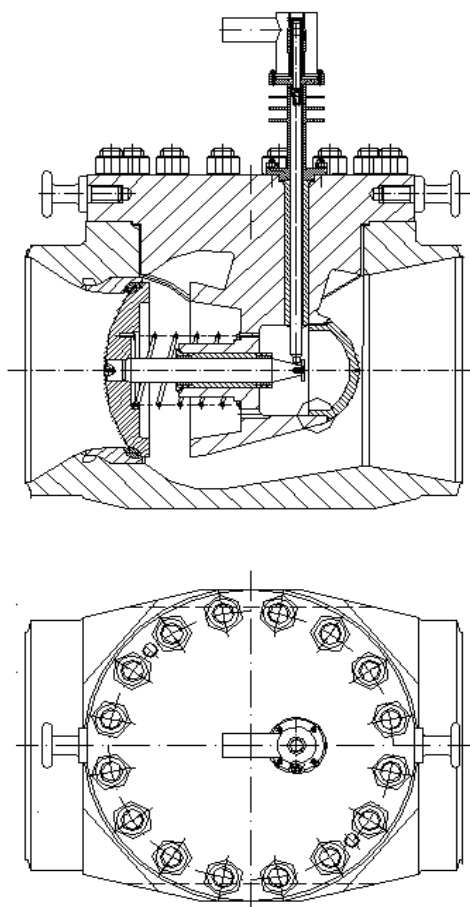


Рисунок 1. Клапаны обратные осесимметричные DN100-600  
Figure 1. Axially symmetrical check valves DN100-600

В соответствии с действующими на арматуру для АЭС нормативно-техническими документами<sup>1</sup> клапаны обратные осесимметричные должны подвергаться приемочным испытаниям, которые включают в себя определение коэффициента гидравлического сопротивления клапана. Испытания проводятся в соответствии с Методикой экспериментального определения гидравлических и кавитационных характеристик арматуры трубопроводной (для конструктивно подобных обратных осесимметричных клапанов АО «НИЦ АЭС» были проведены испытания с определением коэффициента гидравлического сопротивления по ГОСТ Р 55508-2013).

В данной работе предлагается снизить объем испытаний, исключив испытания для промежуточных образцов клапанов (DN 100, DN125, DN 200, DN 300, DN 500, DN 600), расположенных по DN между типовыми образцами клапанов (DN 100, DN175, DN 400), заменив испытания проведением расчетов в программном модуле ANSYS CFX расчетного комплекса ANSYS<sup>2</sup>.

Параметры среды клапана и окружающей среды представлены в таблице 1. Результаты экспериментального определения коэффициента гидравлического сопротивления для клапанов обратных осесимметричных, изготавливаемых по ТУ 6981-254-08847871-07, приведены в таблице 2.

Таблица 1. Параметры среды клапана и окружающей среды

Table 1. Valve medium and ambient parameters

Параметры	Величина
Температура испытательной среды, °C	20±15
Температура окружающего воздуха, °C	20±25
Атмосферное давление, кПа	от 84,0 до 106,7
Рабочая среда	вода

Таблица 2. Результаты определения коэффициента гидравлического сопротивления

Table 2. Results of the determination of the hydraulic resistance coefficient

№ п/п	Обозначение клапана	Р, МПа	Коэффициент гидравлического сопротивления клапана		№ Протокола испытаний АО «НИЦ АЭС»
			Расчетный	Экспериментальный	
1	DN 400	9,0	2,94	3,253	№306 от 30.06.2010
2	DN 175	16,0	2,55	2,5	№255 от 11.04.2008
3	DN 150	4,0	3,4	3,619	№966 от 11.06.2018

Экспериментальное определение гидравлических характеристик проводилось в области квадратичного сопротивления и при отсутствии кавитации (испытания проводились на воде). Для клапана обратного номинальных диаметров  $DN \leq 250$  область квадратичного сопротивления наступает при числах Рейнольдса  $Re \geq 2 \times 10^4$ . Для арматуры номинальных диаметров  $DN \geq 250$  область квадратичного сопротивления  $Re_{кв}$  определяют в процессе экспериментального определения коэффициентов

<sup>1</sup> Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. Основные положения НП-001-15. URL: <http://www.seogan.ru/np-001-15-obshie-polozheniya-obespecheniya-bezopasnosti-atomnix-stanciy.html>; Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования» НП-068-05. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200044037>; Состав и объем испытаний специальной трубопроводной арматуры и приводов для атомных станций. Методические указания МУ 1.2.3.07.0057-2018. URL: [https://standartgost.ru/g/MU\\_1.2.3.07.0057-2018/](https://standartgost.ru/g/MU_1.2.3.07.0057-2018/); Арматура трубопроводная. Методика гидравлического расчета обратных клапанов и затворов. СТ ЦКБА 117-2017. URL: <https://www.normacs.ru/doclist/doc/11QKt.htm/>; ГОСТ Р 55508-2013 Арматура трубопроводная. Методика экспериментального определения гидравлических и кавитационных характеристик. Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2014.

<sup>2</sup> Расчетный комплекс ANSYS CFX, лицензия № 1070122 (в настоящее время широко используемый программный комплекс для решения гидравлических расчетов оборудования для АЭС).

сопротивления и пропускной способности. Порядок определения  $Re_{кв}$  изложен в 7.2.3 ГОСТ 55508-2013.

В соответствии с п.5.9 ГОСТ Р 55508-2013 длина прямых отрезков сменных трубопроводов стенда должна быть не менее двадцати номинальных диаметров на входе арматуры и не менее десяти номинальных диаметров на выходе, как указано для участка стенда испытания арматуры с патрубками на одной оси на рисунке 2.

Испытания были проведены в соответствии с требованиями ГОСТ Р 55508-2013, по ним были оформлены протоколы, указанные в таблице 2.

Для сравнения результатов экспериментального определения коэффициента гидравлического сопротивления клапанов с существующими расчетными методами были проведены серии расчетов в программном модуле ANSYS CFX, и выполнены попытки оценить возможность проведения расчетов данной арматуры методами, изложенными в Методике гидравлического расчета обратных клапанов и затворов арматуры трубопроводной (СТ ЦКБА 117-2017) и в Справочнике по гидравлическим сопротивлениям И.Е. Идельчика [1]. К сожалению, эти методы оценки коэффициента гидравлического сопротивления не подходят для клапанов обратных осесимметричных DN100-600 по ТУ 6981-254-08847871-07 из-за сложной формы внутреннего профиля клапанов и наличия дополнительного гидравлического сопротивления в месте продлена расчетная область.

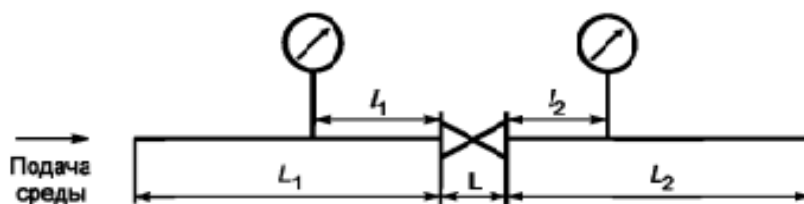


Рисунок 2. Участок стенда для испытания арматуры с патрубками на одной оси в соответствии с требованиями ГОСТ Р 55508-2013

Figure 2. Valve test bench section with spigots on one axis in accordance with the requirements of STATE STANDARD P 55508-2013 R 55508-2013

Трехмерная геометрическая и конечно-элементная модели проточной части клапана изображены на рисунках 3 и 4. Приводится модель, использующая условие симметрии.

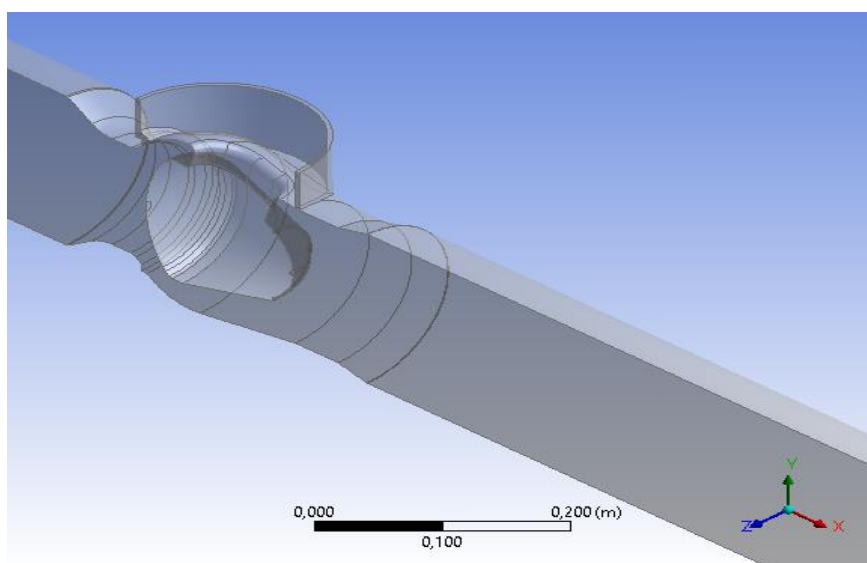


Рисунок 3. Геометрическая модель проточной части

Figure3. Geometric model of the flow part

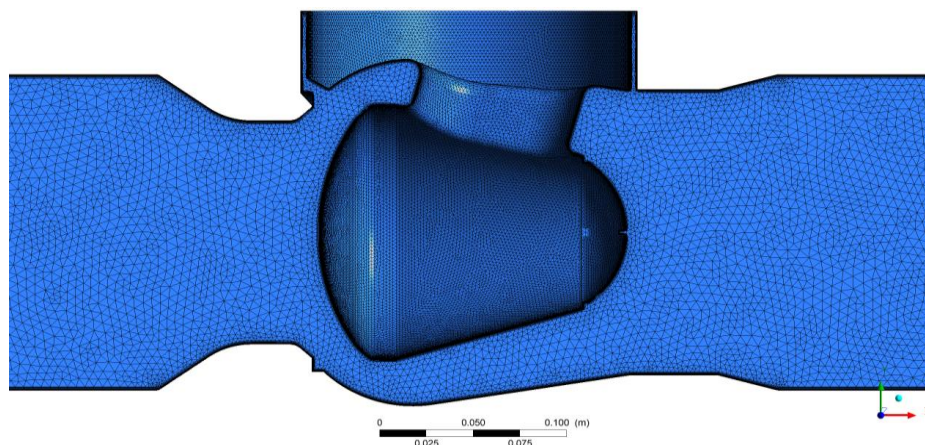


Рисунок 4. Конечно-элементная модель проточной части клапана  
Figure 4. Finite element model of the valve flow area

Движение вязкой сжимаемой жидкости описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных, представляющих собой законы сохранения массы и импульса для сплошной среды [1-7], в данном случае для изометрической задачи.

Для определения коэффициента гидравлического сопротивления при проектировании клапанов DN 150, DN 175, DN 400 по ТУ 6981-254-08847871-07 были проведены серии расчетов в программном модуле ANSYS CFX расчетного комплекса ANSYS.

Согласно ГОСТ Р 55508-2013, длина прямых отрезков сменных трубопроводов стенда должна быть не менее двадцати номинальных диаметров на входе арматуры и не менее десяти номинальных диаметров на выходе, таким образом, продлена расчетная область. При подготовке геометрической модели устранены имеющиеся зазоры и соединительные элементы исходной 3D-модели клапана, не являющиеся необходимыми для учета в расчете. Из твердотельной модели выделена проточная часть, которая и составляет итоговую геометрическую расчетную модель. Проточная часть симметрична относительно вертикальной плоскости, проходящей через крышки, поэтому возможен расчет для одной половины с граничным условием симметрии.

В качестве испытательной среды использовалась модель «Water», обладающая свойствами воды при температуре 20°C. Граничные условия в виде скорости потока прикладывались ко входу в расчетную область модели с учетом числа Рейнольдса, соответствующего области квадратичного сопротивления ( $Re > 2 \cdot 10^4$ ). Математическая модель для описания гидродинамических процессов, происходящих в клапане, состоит из системы уравнений, описывающих стационарное турбулентное движение несжимаемой вязкой жидкости. Для моделирования процессов турбулентного переноса применялась стандартная двухпараметрическая k- $\omega$  модель для высоких чисел Рейнольдса.

Результатами расчета является распределение давлений и скоростей в клапане. Так как поток среды в клапане при измерении является установившимся, в численном расчете решается стационарная задача.

На торцевой поверхности расчетной модели, соответствующей входному патрубку, задано граничное условие в виде потока среды с постоянной скоростью.

На торцевой поверхности расчетной модели, соответствующей выходному патрубку, задано граничное условие постоянного давления, равного нулю, это физически соответствует открытому патрубку. На всей области, кроме входа и выхода, задается граничное условие в виде стенки (wall).

Численное решение поставленной задачи на математической модели — итерационный процесс, сходимость которого оценивают по величине невязок.

По вертикальной оси откладывается значение переменной расхода в процентах, а по горизонтальной оси – количество итераций.

На рисунке 5 показаны графики изменения невязок от числа итераций для массового расхода. Сходимость достигнута.

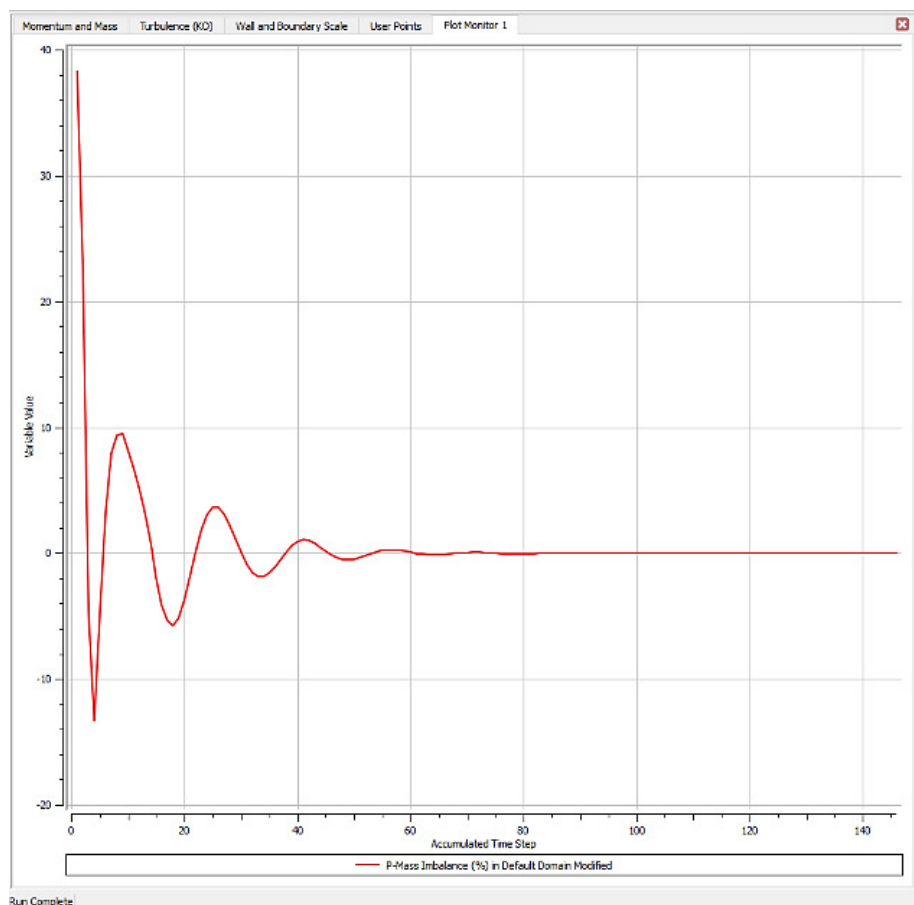


Рисунок 5. Зависимости значений невязок скорости по трем координатам и расхода от числа итераций  
Figure 5. Dependencies of the velocity discrepancy values by three coordinates and the flow rate on the number of iterations

## Выводы

В работе приведены значения коэффициента гидравлического сопротивления для клапанов DN 150, DN 175, DN 400 по ТУ 6981-254-08847871-07, полученные АО «НИЦ АЭС» и приведенные в таблице 2.

Были проведены расчеты значения коэффициента гидравлического сопротивления для клапанов DN 150, DN 175, DN 400 по ТУ 6981-254-08847871-07 в программном модуле ANSYS CFX расчетного комплекса ANSYS, приведенные в таблице 2.

Значение коэффициента гидравлического сопротивления, определенное в результате численного моделирования, совпадает с результатами эксперимента с точностью до 10%, что позволяет сделать вывод о хорошей точности расчетов и позволяет проводить дальнейшие исследования, будучи уверенными в их достоверности.

Данные результаты испытаний на определение коэффициента гидравлического сопротивления для клапанов DN 150, DN 175, DN 400 по ТУ 6981-254-08847871-07 можно использовать при разработке программ приемочных испытаний для установления количества образцов, подвергаемых испытаниям в зависимости от конструктивных особенностей и количества исполнений клапанов обратных (DN 100, DN125, DN 200, DN 300, DN 500, DN 600) в соответствии с рекомендациями



(Состав и объем испытаний специальной трубопроводной арматуры и приводов для атомных станций. Методические указания МУ 1.2.3.07.0057-2018. [https://standartgost.ru/g/MY\\_1.2.3.07.0057-2018/](https://standartgost.ru/g/MY_1.2.3.07.0057-2018/)). В соответствии с таблицей 2 НП-068-05 (Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования» НП-068-05. <https://docs.cntd.ru/document/1200044037>) величина коэффициента гидравлического сопротивления не должна превышать величины 6,0.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям: Под редакцией М.О. Штейнберга. Москва: Машиностроение; 1992. 672 с. URL: <https://tehnavigator.ru/Biblioteka/126.pdf> (дата обращения: 15.02.2023).
2. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара: Справочник. Москва: Энергоатомиздат; 1984. 80 с.
3. Андерсон Д., Таннехил Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2-х томах. Москва: Мир; 1990. 384 с.
4. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена: Перевод с англ. Москва: Мир; 1988. 544 с.
5. Chung T.J. Computational fluid dynamics. *Cambridge university press*. 2002:1012. <https://doi.org/10.1017/S0022112003005445>
6. Rhie C.M., Chow W.L. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation. *AIAA Journal*. 1983;21(11):1525–1532. <https://doi.org/10.2514/3.8284>
7. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. Москва: Физматлит, 2008. 368 с.

## ВКЛАД АВТОРОВ:

**Кузин С.А.** – анализ результатов испытаний и проведение гидравлических расчетов;  
**Кравец С.Б.** – анализ результатов гидравлических расчетов.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Сергей Алексеевич Кузин**, ведущий конструктор, АО «Атоммашэкспорт»; к.т.н., доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7384-5827> ; e-mail: [KuzinSergey55@mail.ru](mailto:KuzinSergey55@mail.ru)

**Сергей Борисович Кравец**, д.т.н., профессор, начальник отдела надежности и качества, ФБУ «Национально-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»; Москва, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8297-3102> ; e-mail: [kravets\\_sb@mail.ru](mailto:kravets_sb@mail.ru)

## AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Kuzin S.A.** – analysis of test results and hydraulic calculations;  
**Kravets S.B.** – analysis of hydraulic calculation results.

## FUNDING:

The study was carried out without external funding sources.

## CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Sergey A. Kuzin**, leading designer, JSC Atommasheport; Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Atomic Energy, Volgodonk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonk, Rostov region, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7384-5827> ; e-mail: [KuzinSergey55@mail.ru](mailto:KuzinSergey55@mail.ru)

**Sergey B. Kravets**, Head of Reliability and Quality Department, National Technical Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8297-3102>; e-mail: [kravets\\_sb@mail.ru](mailto:kravets_sb@mail.ru)

Поступила в редакцию 01.03.2023

После доработки 18.05.2023

Принята к публикации 30.05.2023

Received 01.03.2023

Revision 18.05.2023

Accepted 30.05.2023