

УДК 532.5.013.12
EDN: NBRVVN

Е.И. Попов, В.А. Некрасов, А.В. Фомин

Филиал ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»,
Северодвинск, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ КАПЕЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ: МЕТОД КОНТРОЛЬНЫХ ОБЪЕМОВ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является устройство трансформации закрученного потока. Цель работы – исследование снижения гидравлического сопротивления испытательного трубопровода виброакустического стенда.

Материалы и методы. В работе использованы научное открытие № 357 «Явление трансформации закрученного потока (ТЗП) жидкости или газа при прохождении через ячеистую пространственную решетку», трехмерная модель участка унифицированного виброакустического стенда и пакет программ для численного моделирования методом контрольных объемов.

Основные результаты. В ходе исследования проанализированы результаты численного моделирования, а также проведена оценка влияния устройств ТЗП и завихрителя на снижение гидравлического сопротивления в исследуемом участке трубопровода виброакустического стенда.

Закключение. На основании проведенного численного моделирования установлено, что совместное применение устройства ТЗП с 4 секторами и завихрителя обеспечивает снижение гидравлического сопротивления исследуемого участка трубопровода.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, трансформация потока, численное моделирование, гидродинамический шум, закрученный поток, потери напора, трубопроводная сеть.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 532.5.013.12
EDN: NBRVVN

E.I. Popov, V.A. Nekrasov, A.V. Fomin

Lomonosov Northern (Arctic) Federal University, Severodvinsk, Russia

NUMERICAL SIMULATION OF SWIRLING DROP FLOW TRANSFORMATIONS AS PER FINITE-VOLUME METHOD (FVM)

Object and purpose of research. This paper discusses transformations of swirled flow to investigate reduction in hydraulic resistance of the experimental pipeline at vibroacoustic test rig.

Materials and methods. This paper is based on Discovery No. 357 “Transformation phenomenon of liquid or gas swirl flows passing through 3D cellular lattice,” 3D model of a standard vibroacoustic facility section and software package for FVM-based simulations.

Main results. The study analysed the results of numerical simulations and estimated the effect made by swirl flow transformers and swirler upon reduction of hydraulic resistance at the test section of the pipeline at vibroacoustic test rig.

Conclusion. Numerical simulation has shown that joint application of 4-sector swirl flow transformer and swirler made it possible to reduce hydraulic resistance at the test section of the pipeline.

Keywords: hydraulic resistance, flow transformation, numerical simulation, flow noise, swirled flow, pressure drops, piping.

The authors declare no conflicts of interest.

Для цитирования: Попов Е.И., Некрасов В.А., Фомин А.В. Численное моделирование трансформации закрученных потоков капельной жидкости: метод контрольных объемов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2026; 1(415): 179–184.

For citations: Popov E.I., Nekrasov V.A., Fomin A.V. Numerical simulation of swirling drop flow transformations as per finite-volume method (FVM). Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026; 1(415): 179–184 (in Russian).

Введение

Introduction

На основании ранее проведенных исследований методом численного моделирования по снижению гидравлического сопротивления способом трансформации потока испытательного участка трубопровода виброакустического стенда выявлено, что применение только одной ячеистой пространственной решетки, установленной в исследуемый участок трубопровода, не обеспечивает требуемого эффекта.

Также установлено, что наиболее эффективное снижение гидравлического сопротивления достигается при использовании комплексного устройства, состоящего из устройства ТЗП с 4 секторами и завихрителя.

Завихрители – это специальные устройства, которые придают газовому или жидкостному потоку вращательную (тангенциальную) составляющую скорости. Используемые на практике завихрители позволяют сообщать потоку вращательную составляющую скорости, различные комбинации осевого и вращательного движения потока, а также формировать частичную закрутку. При этом завихрители могут располагаться как на входе в канал (местная закрутка), так и по всей его длине (протяженные завихрители).

Проведенный анализ устройств (аппаратов), способных придать потоку определенные параметры закрутки потока, показал, что аксиально-лопаточный завихритель (АЛЗ) создает широкие возможности формирования скоростных полей на входе в канал,

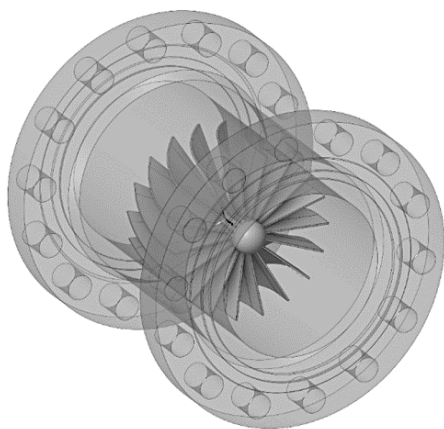


Рис. 1. Трехмерная математическая модель аксиально-лопаточного завихрителя с центральным телом (телом вращения)

Fig. 1. 3D model of axial-blade swirler with body of revolution at its center

отличающихся степенью закрутки потока и характером изменения вращательной скорости по радиусу. Поэтому АЛЗ в экспериментальном плане является наиболее подходящим устройством для закрутки и изучения потока рабочей среды.

Подготовка к проведению численных экспериментов

Preparation of numerical experiments

В соответствии с отраслевым стандартом по расчету и проектированию завихрителей различных типов с использованием программного пакета Ansys SpaceClaim разработана трехмерная математическая модель АЛЗ с центральным телом (телом вращения) Ду 200 и углом закрутки 45°. Данная модель представлена на рис. 1.

Создание комплексной трехмерной математической сеточной модели, включающей устройство ТЗП и АЛЗ с центральным телом (телом вращения), считается нецелесообразным вследствие существенного увеличения числа расчетных ячеек в пристеночной области, необходимых для корректного разрешения вязкого гидродинамического подслоя напрямую.

Увеличение количества расчетных ячеек приводит к существенному росту вычислительных и временных затрат. В связи с этим принято решение разбить задачу на этапы:

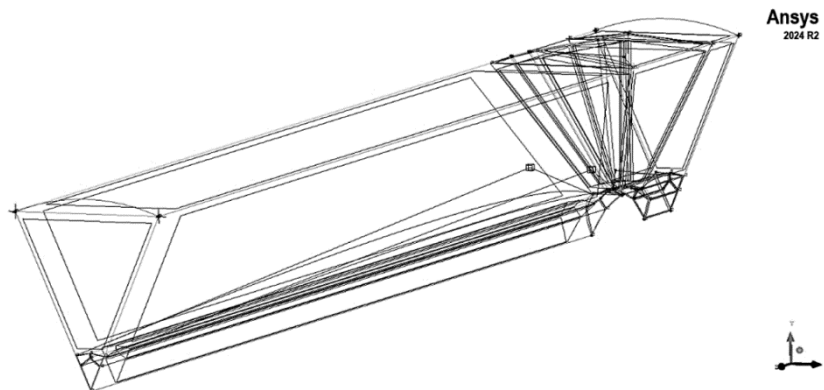
1. определить распределение значений скорости потока по поперечному сечению канала после завихрителя;
2. использовать полученное распределение скоростей потока по поперечному сечению в качестве входного граничного условия для трехмерной математической сеточной модели с устройством ТЗП.

Создание трехмерной математической сеточной модели АЛЗ с центральным телом осуществлялось в программном пакете Ansys ICEM CFD. Данная модель имеет особый тип блочной структуры O-Grid и состоит исключительно из гексаэдрических элементов. Блочная структура трехмерной математической модели АЛЗ с центральным телом (телом вращения) представлена на рис. 2.

Исходя из анализа преимуществ и недостатков моделирования турбулентного течения расчетная сетка строилась по следующим критериям: метод моделирования турбулентности RANS, модель турбулентности – SST семейства $k-\omega$, $y^+ = 1$. Указанные параметры обеспечивают прямое разрешение гидродинамического пограничного слоя.

Рис. 2. Блочная структура трехмерной математической модели аксиально-лопаточного завихрителя с центральным телом (телом вращения)

Fig. 2. Block diagram for 3D model of axial-blade swirler with body of revolution at its center



Трехмерная математическая сеточная модель АЛЗ с центральным телом (телом вращения), представленная на рис. 3 (см. вклейку), имеет 24 182 135 узлов и 24 390 120 ячеек. Расстояние от стенки трубопровода и стенок АЛЗ до центра первой ячейки составляет 0,021 мм, степень роста ячеек 1,15. В табл. 1 приведены основные качественные характеристики оценки трехмерной математической сеточной модели АЛЗ с центральным телом.

Для решения данной и последующих задач были задействованы следующие вычислительные ресурсы: 2 процессора Intel Xeon gold 6148 (40 вычислительных ядер) и 12 планок по 16 Гб DDR4 ECC с частотой 2666 МГц (192 Гб).

Линии тока, поля скорости и векторные характеристики, представленные на рис. 4 и 5 (см. вклейку), свидетельствуют о том, что при прохождении через АЛЗ поток рабочей среды приобретает угол закручивания, величина которого определяется конструкцией профиля лопаток. Далее поток с вихревой структурой продолжает движение по системе.

Полученные значения скорости потока по поперечному сечению канала после завихрителя ис-

пользуются в качестве входных граничных условий для трехмерных сеточных моделей с различной комбинацией устройств.

Коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) определяется по формуле:

$$\zeta_{\text{общ.}} = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot V^2},$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; V – осевая скорость потока в поперечном сечении, м/с; Δp – разность полного давления в сечениях 1-1 и 2-2.

На рис. 6 (см. вклейку) представлен исследуемый участок трубопровода с расчетными сечениями 1-1 и 2-2. В качестве расчетных сечений были выбраны сечения после разделителя на расстоянии 100 мм (сечение 1-1) и на выходной границе исследуемого участка трубопровода (сечение 2-2).

Результаты численного моделирования, представленные на рис. 7 и 8 (см. вклейку), а также в табл. 2 и 3, показали, что совместное применение устройства ТЗП и завихрителя обеспечивает снижение гидравлического сопротивления исследуемого участка трубопровода. Установлена зависимость

Таблица 1. Качественные характеристики трехмерной математической сеточной модели аксиально-лопаточного завихрителя с центральным телом

Table 1. Qualitative parameters of mesh-based 3D model of axial-blade swirler with body of revolution at its center

№	Наименование параметра	Минимальное значение по гистограмме	Максимальное значение по гистограмме	Диапазон рекомендуемых значений, °
1	Angle	18,1	89,91	Не менее 18
2	Aspect Ratio	1	176	Желательно меньше 100
3	Skewness	0	0,8	Не более 0,95
4	Orthogonal Quality	0,276	1	Не менее 0,2
5	Quality	0,28	1	Не менее 0,2

указанного гидравлического сопротивления от количества секторов устройства ТЗП: увеличение числа секторов приводит к уменьшению гидравлического сопротивления. Гидравлическое сопротивление разделенного закрученного потока примерно в 2 раза ниже, чем у закрученного, но не разделенного потока.

Применение устройства ТЗП совместно с завихрителем, имеющим 4 сектора, обеспечивает снижение гидравлического сопротивления потока на 12 % по сравнению с незакрученным и неразде-

ленным потоком. При изменении расхода от 280 до 500 м³/ч рабочей среды при прохождении через завихритель и устройство ТЗП количественное соотношение КГС исследуемого участка трубопровода сохраняется неизменным.

Заключение

Conclusion

На основании проведенного анализа результатов теоретических исследований, выполненных мето-

Таблица 2. Значения коэффициентов гидравлического сопротивления исследуемого участка трубопровода с различными комбинациями устройств при объемном расходе 280 м³/ч

Table 2. Hydraulic resistance coefficients for pipeline test sections with various combinations of hardware: flow rate 280 m³/h

№	Наименование комбинации	Числовое значение полного давления в сечении 1-1, Па	Числовое значение полного давления в сечении 2-2, Па	Общий коэффициент гидравлического сопротивления
1	Без завихрителя и устройства ТЗП	5414,820	3113,790	0,752
2	Без завихрителя, но с устройством ТЗП на 2 сектора	5303,870	3110,410	0,717
3	С завихрителем, но без устройства ТЗП	7163,290	3421,610	1,223
4	С завихрителем и устройством ТЗП на 2 сектора	5682,540	3118,330	0,838
5	С завихрителем и устройством ТЗП на 3 сектора	5332,760	3103,840	0,728
6	С завихрителем и устройством ТЗП на 4 сектора	5134,530	3103,250	0,664

Таблица 3. Значения коэффициентов гидравлического сопротивления исследуемого участка трубопровода с различными комбинациями устройств при объемном расходе 500 м³/ч

Table 3. Hydraulic resistance coefficients for pipeline test sections with various combinations of hardware: flow rate 500 m³/h

№	Наименование комбинации	Числовое значение полного давления в сечении 1-1, Па	Числовое значение полного давления в сечении 2-2, Па	Общий коэффициент гидравлического сопротивления
1	Без завихрителя и устройства ТЗП	16 567,900	9919,970	0,681
2	Без завихрителя, но с устройством ТЗП на 2 сектора	16 537,100	9902,100	0,680
3	С завихрителем, но без устройства ТЗП	22 578,600	11 051,100	1,182
4	С завихрителем и устройством ТЗП на 2 сектора	17 413,100	9922,420	0,768
5	С завихрителем и устройством ТЗП на 3 сектора	16 510,000	9895,950	0,678
6	С завихрителем и устройством ТЗП на 4 сектора	15 807,700	9886,640	0,607

дом численного моделирования, представлены следующие выводы:

1. Совместное применение устройства ТЗП и завихрителя обеспечивает снижение гидравлического сопротивления исследуемого участка трубопровода.
 2. Установлена зависимость гидравлического сопротивления исследуемого участка трубопровода от количества секторов устройства ТЗП: увеличение числа секторов приводит к уменьшению гидравлического сопротивления.
 3. Гидравлическое сопротивление разделенного закрученного потока примерно в 2 раза ниже, чем у закрученного, но не разделенного потока.
 4. Применение устройства ТЗП совместно с завихрителем, имеющим 4 сектора, обеспечивает снижение гидравлического сопротивления потока на 12 % по сравнению с незакрученным и неразделенным потоком.
 5. При изменении расхода от 280 до 500 м³/ч рабочей среды при прохождении через завихритель и устройство ТЗП количественное соотношение коэффициентов гидравлического сопротивления исследуемого участка трубопровода сохраняется неизменным.
8. Основы работы в ANSYS 17 / *Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захаров* Москва : ДМК Пресс, 2017. 210 с.
 9. *Митрофанова О.В.* Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. Москва : Физмалит, 2010. 288 с.
 10. *Волков К.Н., Емельянов В.Н.* Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. Москва : Физмалит, 2008. 368 с. (Фундаментальная и прикладная физика).
 11. Акустические взаимодействия в газовых потоках / *К.Н. Волков, В.Н. Емельянов, А.И. Цветков* [и др.]. Москва : Физмалит, 2021. 592 с.
 12. *Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л.* Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений : учебное пособие. Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 88 с.
 13. *Быков Л.В., Молчанов А.М., Янышев Д.С.* Сеточные модели для решения инженерных теплофизических задач в среде ANSYS : учебное пособие. Москва : Ленанд, 2021. 264 с.
 14. *Горобец А.Г.* Вихревые потоки в судовых системах и устройствах // Вестник государственного ун-та морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. 2019. Т. 11, № 2. С. 349–356. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-349-356.

Список использованной литературы

1. *Попов Е.И., Некрасов В.А., Фомин А.В.* Обзор способов регулирования гидравлических сопротивлений // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1, т. 1. С. 123–128. DOI 10.37220/MIT.2024.63.1.014.
2. Способ трансформации потоков : пат. 2270374 Рос. Федерация / *Е.М. Аин, А.В. Агеев, А.Г. Горобец* [и др.]. № 2004119634/06; заявл. 28.06.2004; опубл. 20.02.2006, Бюл. № 5. 4 с.
3. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. 7-е изд., испр. Москва : Дрофа, 2003. 840 с. (Классики отечественной науки).
4. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя / Пер. *Г.А. Вольперта* с 5-го нем. изд. Москва : Наука, 1974. 711 с.
5. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Машиностроение, 1975. 559 с.
6. *Емельянов В.Н.* Механика сплошной среды: теория напряжений и основные модели : учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. Москва : Юрайт, 2024. 162 с. (Высшее образование).
7. *Быков Л.В., Молчанов А.М., Янышев Д.С.* Основы вычислительного теплообмена и гидродинамики : учебное пособие. Изд. 3-е, стереотип. Москва : Ленанд, 2021. 200 с.

References

1. *Popov E.I., Nekrasov V.A., Fomin A.V.* Review of the methods for regulation of hydraulic resistance // Marine intellectual technologies. 2024. Vol. 1, No. 1. P. 123–128. DOI: 10.37220/MIT.2024.63.1.014 (in Russian).
2. A method of flow transformation. Patent 2270374 Russian Federation / *E.M. Ain, A.V. Ageev, A.G. Gorobets* [et al.]. No. 2004119634/06, appl. date 28.06.2004; publ. date 20.02.2006. Bul. No. 5. 4 p. (in Russian).
3. *Loitsyanskiy L.G.* Fluid mechanics: Guidebook for Universities. 7th edition, revised. Moscow : Drofa, 2003. 840 p. (Classics of Russian Science) (in Russian).
4. *Schlichting H.* Boundary layer theory / Russian translation by *G.A. Volpert*. Moscow : Nauka, 1974. 711 p.
5. *Idelchik I.E.* Hydraulic resistance handbook. 2nd edition, revised and amended. Moscow : Mashinostroenie, 1975. 559 p. (in Russian).
6. *Emelianov V.N.* Continuum mechanics: strain theory and main models : Teaching aid. 2nd edition, revised and amended. Moscow : Yurait, 2024. 162 p. (in Russian).
7. *Bykov L.V., Molchanov A.M., Yanyshv D.S.* Basics of computational heat exchange and hydrodynamics : Teaching aid. 3rd edition, reprinted. Moscow : Lenand, 2021. 194 p. (in Russian).

8. ANSYS 17 Basic operations / *N.N. Fedorova, S.A. Valger, M.N. Danilov, Yu.V. Zakharova*. Moscow : DMK Press, 2017. 210 p. (in Russian).
9. *Mitrofanova O.V.* Hydrodynamics and heat exchange of swirl flows in nuclear reactor channels. Moscow : Fizmatlit, 2010. 288 p. (in Russian).
10. *Volkov K.N., Emelianov V.N.* Modeling of large eddies in turbulent flow calculations. Moscow : Fizmatlit, 2008. 368 p. (in Russian).
11. Acoustic interactions in gas flows / *K.N. Volkov, V.N. Emelianov, A.I. Tsvetkov* [et al]. Moscow : Fizmatlit, 2021. 592 p. (in Russian).
12. *Garbaruk A.V., Strelets M.Kh., Shur M.L.* Turbulence modeling in calculations of complex flows : Student's guide. St. Petersburg : Polytechnic University Publishing House, 2012. 88 p. (in Russian).
13. *Bykov L.V., Molchanov A.M., Yanyshchev D.S.* Mesh models for solving engineering heat exchange problems in ANSYS environment : Teaching aid. Moscow : Lenand, 2021. 264 p. (in Russian).
14. *Gorobets A.G.* Vortex flows in ship systems and gears // Bulletin of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. 2019. Vol. 11, No. 2. P. 349–356. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-349-356 (in Russian).

Сведения об авторах

Попов Евгений Игоревич, аспирант, ассистент кафедры океанотехники и энергетических установок ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (филиал САФУ в Северодвинске). Адрес: 164500, Россия, Архангельская обл., Северодвинск, ул. Капитана Воронина, д. 6. E-mail: e.i.popov@narfu.ru.

Некрасов Владимир Александрович, д.т.н., профессор кафедры океанотехники и энергетических установок ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (филиал САФУ в Северодвинске); начальник сектора ПО «Севмаш». Адрес: 164500, Россия, Архангельская обл., Северодвинск, Архангельское шоссе, д. 58. E-mail: alexv57@rambler.ru.

Фомин Александр Владимирович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой океанотехники и энергетических установок ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (филиал САФУ в Северодвинске). Адрес: 164500, Россия, Архангельская обл., Северодвинск, ул. Капитана Воронина, д. 6. E-mail: a.fomin@narfu.ru.

About the authors

Evgeny I. Popov, Postgraduate, Assistant of Ocean Technology and Power Engineering Department, Northern (Arctic) Federal University, Severodvinsk Branch. Address: 6, Kapitana Voronina st., Severodvinsk, Arkhangelsk Region, Russia, post code 164500. E-mail: e.i.popov@narfu.ru.

Vladimir A. Nekrasov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Ocean Technology and Power Engineering Department, Northern (Arctic) Federal University, Severodvinsk Branch; Head of Sector, JSC Sevmash. Address: 58, Arkhangelskoe sh., Severodvinsk, Arkhangelsk Region, Russia, post code 164500. E-mail: alexv57@rambler.ru.

Alexander V. Fomin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Ocean Technology and Power Engineering Department, Northern (Arctic) Federal University, Severodvinsk Branch. Address: 6, Kapitana Voronina st., Severodvinsk, Arkhangelsk Region, Russia, post code 164500. E-mail: a.fomin@narfu.ru.

Поступила / Received: 23.09.25
Принята в печать / Accepted: 18.02.26
© Попов Е.И., Некрасов В.А., Фомин А.В., 2026

Рис. 3. Трехмерная математическая модель аксиально-лопаточного завихрителя с центральным телом (телом вращения)

Fig. 3. 3D model of axial-blade swirler with body of revolution at its center

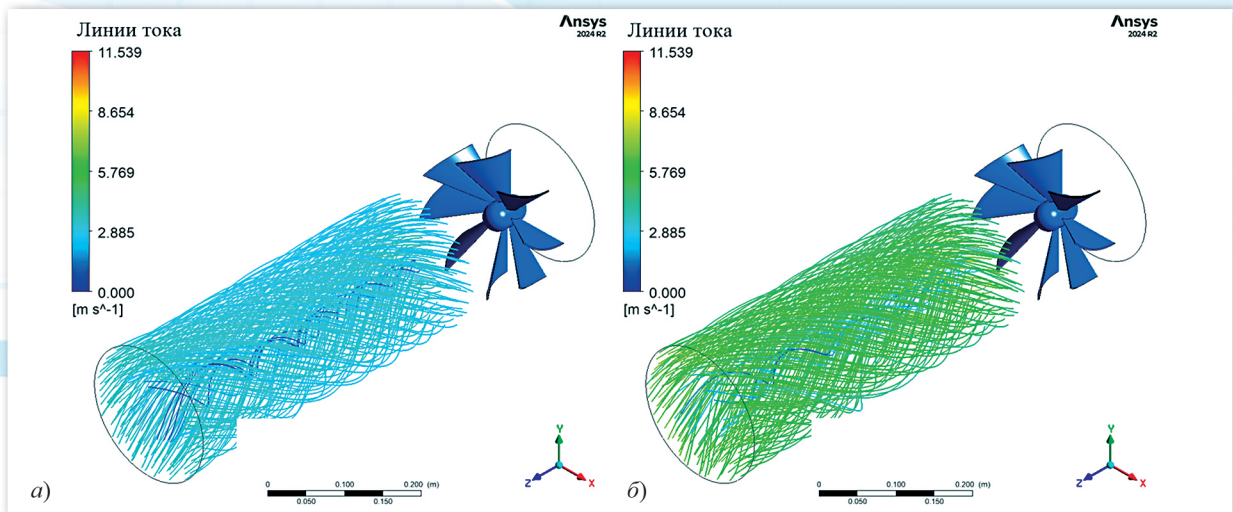
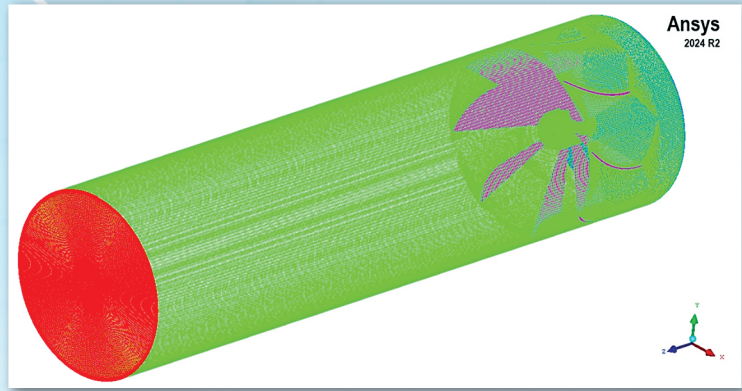


Рис. 4. Линии тока в исследуемом участке трубопровода с установленным аксиально-лопаточным завихрителем с центральным телом (телом вращения): а) при объемном расходе 280 м³/ч; б) при объемном расходе 500 м³/ч

Fig. 4. Flow lines in pipe test section featuring axial-blade swirler with body of revolution at its center: a) flow rate 280 m³/h; b) flow rate 500 m³/h

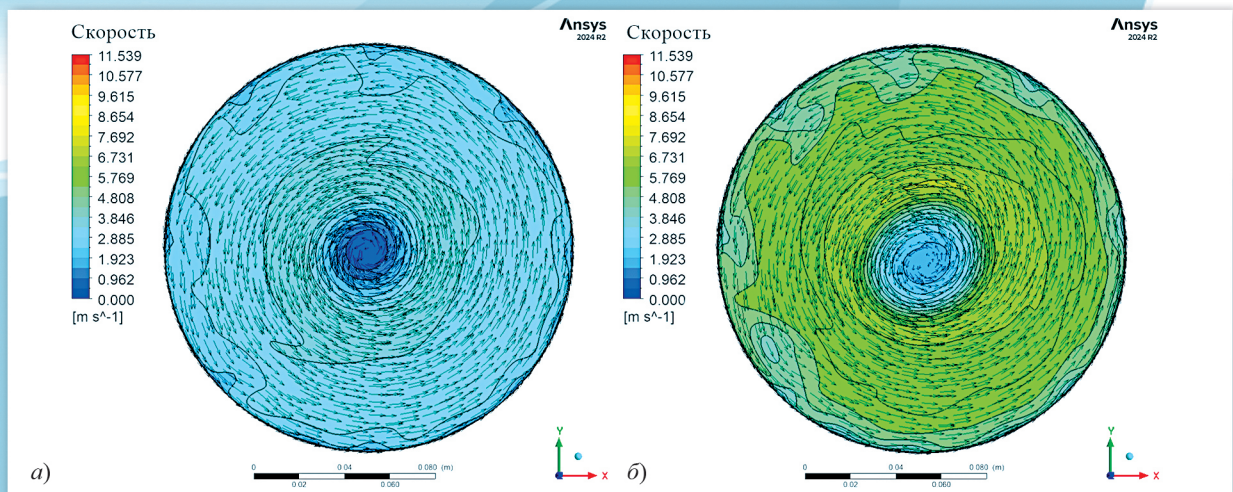


Рис. 5. Характеристика поля скорости и векторных параметров потока после аксиально-лопаточного завихрителя с центральным телом (телом вращения): а) при объемном расходе 280 м³/ч; б) при объемном расходе 500 м³/ч

Fig. 5. Velocity field and vector parameters of the flow downstream axial-blade swirler with body of revolution at its center: a) flow rate 280 m³/h; b) flow rate 500 m³/h

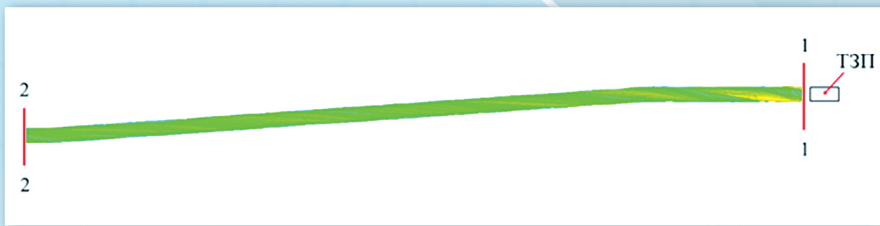


Рис. 6. Расчетные сечения секущих плоскостей для определения числовых значений полного давления и осевой скорости

Fig. 6. Analytical results for the sections of secant planes needed to obtain total pressure and axial velocity values

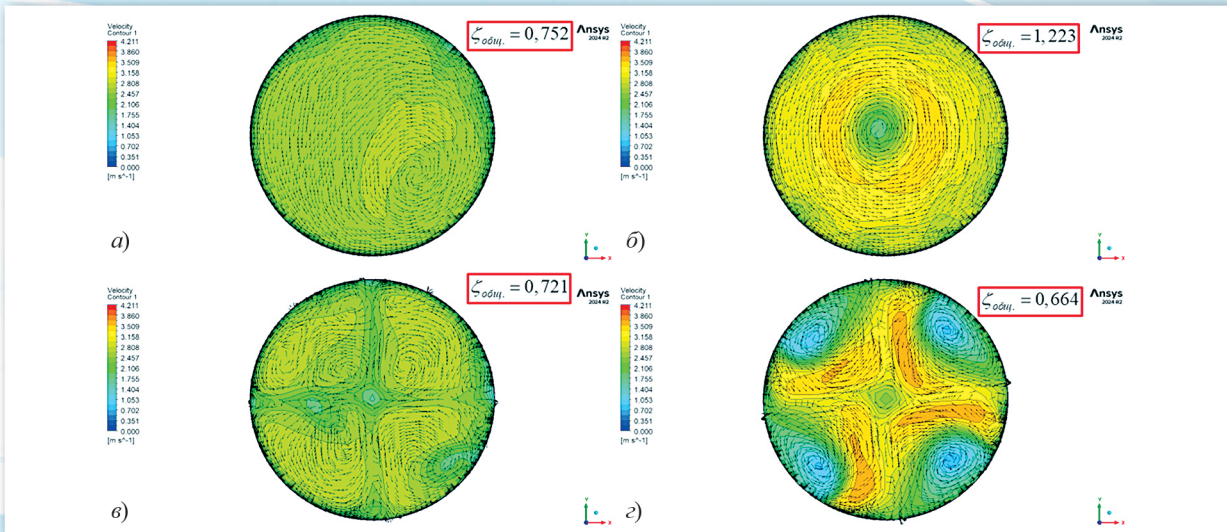


Рис. 7. Поля скоростей, векторных характеристик и коэффициентов гидравлического сопротивления исследуемого участка трубопровода при объемном расходе 280 м³/ч: а) без устройства трансформации закрученного потока (далее – ТЗП) и завихрителя; б) без устройства ТЗП, но с завихрителем; в) с устройством ТЗП с 4 секторами, но без завихрителя; г) с устройством ТЗП с 4 секторами и завихрителем

Fig. 7. Velocity fields, vector parameters and hydraulic resistance coefficients for pipeline test section at flow rate 280 m³/h: a) no swirled flow transformer (SFT), no swirler; b) swirler only (no SFT); c) SFT only (4 sectors), no swirler; d) SFT (4 sectors) + swirler

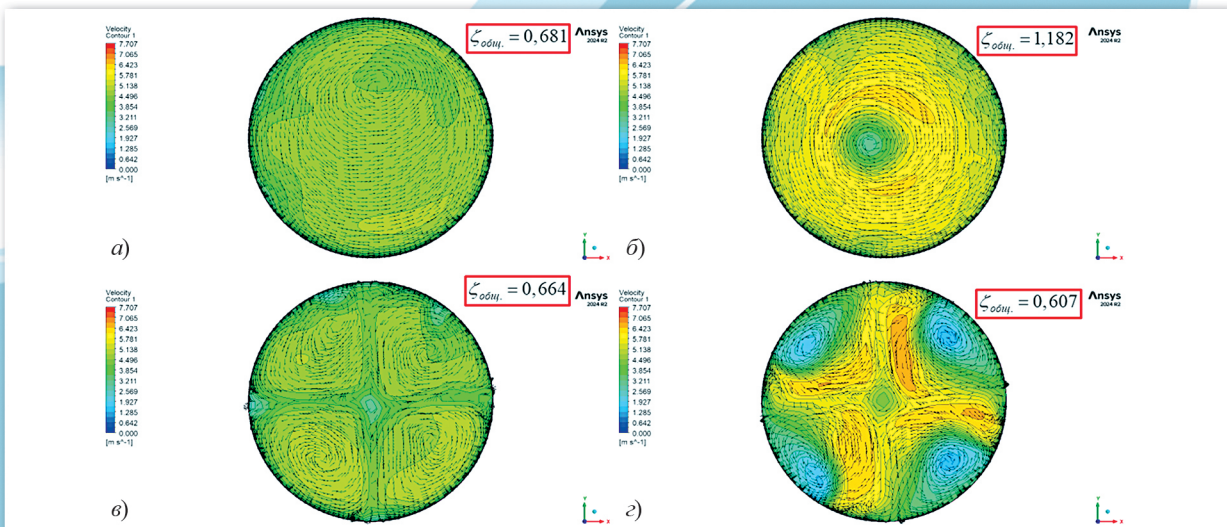


Рис. 8. Поля скоростей, векторных характеристик и коэффициентов гидравлического сопротивления исследуемого участка трубопровода при объемном расходе 500 м³/ч: а) без устройства ТЗП и завихрителя; б) без устройства ТЗП, но с завихрителем; в) с устройством ТЗП с 4 секторами, но без завихрителя; г) с устройством ТЗП с 4 секторами и завихрителем

Fig. 8. Velocity fields, vector parameters and hydraulic resistance coefficients for pipeline test section at flow rate 500 m³/h: a) no swirled flow transformer (SFT), no swirler; b) swirler only (no SFT); c) SFT only (4 sectors), no swirler; d) SFT (4 sectors) + swirler