

Численные методы моделирования Numerical simulation methods

Научная статья

УДК 532.5.032

DOI: 10.14529/engin240411

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ВИХРЕВОМ ГИДРОДИОДЕ

Д.Г. Гизбрехт, gizbdenis@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-7209-4255>

И.И. Лазарев, lazarevii@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-8129-9842>

А.В. Подзерко, podzerkoav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9079-3523>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Статья посвящена выбору параметров моделирования при проведении численного исследования течения жидкости в проточной части вихревого гидравлического диода. Течение жидкости в вихревом диоде является сложным, включающим в себя плоские и объемные вихри. Поэтому корректный выбор параметров моделирования при проведении численного эксперимента затруднителен. Обзор научно-технической литературы показал, что в настоящее время отсутствует единый подход при численном моделировании потоков в вихревом диоде.

В данной работе проведено численное моделирование течения жидкости в прямом и обратном направлениях вихревого гидравлического диода с применением параметров, выявленных в ходе выполненного обзора литературы, как наиболее часто используемых в исследованиях вихревых диодов. Так, в качестве моделей турбулентностей применены $k-\epsilon$, SST, RSM и ламинарная модель. Представлены результаты моделирования и их анализ. Кроме того, в ходе работы проведен физический эксперимент, целью которого явилось получение действительных характеристик исследуемого вихревого диода. Для проверки адекватности результатов численного моделирования с применением различных моделей турбулентности и ламинарной модели проведено сравнение результатов физического эксперимента и результатов численного моделирования. При этом сравнение производилось по сосредоточенным параметрам.

Установлено, что в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса наиболее предпочтительной с точки зрения точности получаемых результатов моделирования течения в вихревом диоде является модель турбулентности RSM для моделирования потока в прямом и обратном направлениях. При этом модель SST ввиду меньших требований к ресурсу в сравнении с RSM и относительно высокой точности моделирования потоков в вихревых диодах при больших числах Рейнольдса может быть использована в моделировании для предварительных расчетов гидродиода.

Ключевые слова: вихревой диод, вычислительная гидродинамика, модель турбулентности, численный анализ, экспериментальное исследование

Благодарности. Работа выполнена при поддержке грантовой программы «Шаг в будущее» В.Б. Христенко.

Для цитирования: Гизбрехт Д.Г., Лазарев И.И., Подзерко А.В. Численное моделирование стационарного течения жидкости в вихревом гидродиоде // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2024. Т. 24, № 4. С. 140–153. DOI: 10.14529/engin240411

Original article
DOI: 10.14529/engin240411

NUMERICAL SIMULATION OF STEADY FLUID FLOW IN A VORTEX DIODE

D.G. Gizbrekht, gizbdenis@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-7209-4255>

I.I. Lazarev, lazarevii@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-8129-9842>

A.V. Podzerko, podzerkoav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9079-3523>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article is devoted to the selection of modeling parameters when conducting a numerical study of fluid flow in the flow part of a vortex fluidic diode. The fluid flow in a vortex diode is complex, including flat and volume vortices. Therefore, the correct choice of modeling parameters when conducting a numerical experiment is difficult. A review of scientific and technical literature has shown that there is currently no unified approach to numerical modeling of flows in a vortex diode.

In this paper, a numerical modeling of fluid flow in the forward and reverse directions of a vortex fluidic diode is carried out using the parameters identified during the literature review as the most frequently used in vortex diode studies. Thus, k - ϵ , SST, RSM and the laminar model are used as turbulence models. The modeling results and their analysis are presented. In addition, a physical experiment was conducted during the work, the purpose of which was to obtain the actual characteristics of the vortex diode under study. To check the adequacy of the numerical simulation results using various turbulence models and a laminar model, a comparison of the results of a physical experiment and the results of numerical simulation was carried out. In this case, the comparison was made using integrated parameters.

It has been established that in the studied range of Reynolds numbers the most preferable from the point of view of the accuracy of the obtained results of flow modeling in a vortex diode is the RSM turbulence model for flow modeling in the forward and reverse directions. At the same time, the SST model, due to lower resource requirements in comparison with the RSM and relatively high accuracy of flow modeling in vortex diodes at high Reynolds numbers, can be used in modeling for preliminary calculations of a vortex diode.

Keywords: vortex diode, computational fluid dynamics, turbulence model, numerical analysis, experimental research

Acknowledgments. The study was supported by grant program of V.B. Khristenko “Shag v budushchee”.

For citation: Gizbrekht D.G., Lazarev I.I., Podzerko A.V. Numerical simulation of steady fluid flow in a vortex diode. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2024;24(4):140–153. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin240411

Введение

Гидравлический диод является проточным элементом, коэффициент гидравлического сопротивления которого существенно различается при прямом и обратном направлении движения жидкости через него. Таким образом, поток жидкости с равным расходом в прямом направлении диода движется при значительно меньшем перепаде давлений на гидродиоде, чем в обратном [1, 2]. Отличительной особенностью гидравлических диодов является отсутствие подвижных элементов в проточной части.

Гидродиоды нашли применение в трубопроводных системах для предотвращения гидравлического удара [3], для ограничения расхода теплоносителя через теплообменники системы вспомогательного охлаждения ядерных реакторов при принудительной циркуляции с обеспечением беспрепятственного течения теплоносителя в противоположном направлении при естественной циркуляции [4, 5], в качестве кавитаторов в системах очистки и обеззараживания воды [6], в качестве органов распределения жидкости в насосах с вытеснителем возвратно-поступательного действия [7–9], а также в различных приложениях в микрофлюидике [10, 11].

Основной характеристикой диода, определяющей его качество, является диодность, которая представляет собой отношение коэффициентов гидравлического сопротивления при движении жидкости в обратном $\zeta_{об}$ и в прямом $\zeta_{пр}$ направлениях:

$$D = \frac{\zeta_{\text{об}}}{\zeta_{\text{пр}}}. \quad (1)$$

Наиболее перспективным с точки зрения диодности является вихревой диод [12]. Так, существуют исследования, в которых диодность вихревых диодов достигалась более 200 единиц [13].

Разработка новых устройств, включающих в свой состав вихревые гидравлические диоды, требует анализа течения жидкости в проточной части диода в стационарной и нестационарной постановках. При этом следует отметить, что течение жидкости в диоде является сложным, включающим в себя плоские и объемные вихри. Следовательно, применение средств вычислительной гидродинамики для решения задачи анализа течения жидкости в вихревом диоде является обоснованным ввиду комплексности математического описания такого течения. При этом сложность течения жидкости в проточной части диода требует подбора адекватных параметров моделирования, позволяющих с удовлетворительной точностью описать явления, имеющие место быть в потоке.

В работе [14] показано, что использование моделей вихревой вязкости, положительно зарекомендовавших себя для плоских течений, при наличии объемных вихрей дают неудовлетворительный результат. Автор предпринимает попытки усовершенствования двухпараметрических моделей за счет внесения эмпирических поправок корректировки самой турбулентной вязкости. В статье [15] проведено исследование точности и ресурсоемкости различных моделей турбулентности, полученные результаты говорят о том, что с увеличением числа Рейнольдса роль подсеточного моделирования возрастает. В работе [16] авторы приходят к выводу, что успешное применение модели крупных вихрей (LES) требует решения некоторых вопросов, таких как создание методической базы метода LES, определение критериев сходимости и др.

Отсутствие единого подхода к моделированию вихревых течений является проблемой при проектировании вихревых диодов. Авторы используют различные модели турбулентности, настройки сетки и критерии сходимости. Так, в работе [17] Kulkarni и др. проводят серию расчетов вихревых диодов, пренебрегая напряжениями Рейнольдса и учитывая только молекулярную вязкость, верифицируя свой подход путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными [18]. При этом в первом приближении авторы используют модель турбулентности k-ε, однако полученные результаты не показывают удовлетворительной сходимости с экспериментом. Цветков и др. [19] моделируют в ANSYS диод повышенной диодности при помощи модели вихревой вязкости SST, а Yin и др. в своей работе [20] описывают моделирование вихревого диода с помощью модели больших вихрей LES. В работе [21] Pandare и др. используют для численного моделирования вихревого диода модель турбулентности SST. В работах [22] и [13] авторы используют модель турбулентности RSM.

Аналитический обзор научно-технической литературы показывает, что в настоящее время отсутствует единый подход к моделированию течения жидкости в проточной части вихревого гидравлического диода. Это затрудняет применение численного моделирования при постановке численных экспериментов, направленных на исследования вихревых диодов.

Данная работа направлена на определение оптимальных параметров численного моделирования, применение которых при постановке численного эксперимента позволяет получить результаты удовлетворительной точности.

Для решения поставленной задачи проведена серия численных экспериментов с применением ряда моделей турбулентности, адекватность которых оценивалась путем сопоставления результатов численного моделирования и физического эксперимента.

В качестве объекта исследования выбран вихревой гидравлический диод, профиль и размеры проточной части которого описаны в статье [17].

В данном исследовании рассмотрены четыре наиболее часто используемые при моделировании течений в вихревых диодах математические модели турбулентности. В результате каждого численного эксперимента были определены зависимости перепадов статических давлений на гидродиоде в прямом и обратном направлении и основная характеристика диода – зависимость диодности от числа Рейнольдса.

С целью проверки адекватности применения выбранных для исследования моделей турбулентности проведен физический эксперимент, в результате которого получены зависимости пе-

репадов давлений в прямом и обратном направлении диода от расхода, а также зависимость диодности от числа Рейнольдса

Верификация численной модели осуществлялась методом сравнения результатов численного моделирования и физического эксперимента.

Материалы и методы

Геометрическая модель исследуемого вихревого диода представлена на рис. 1.

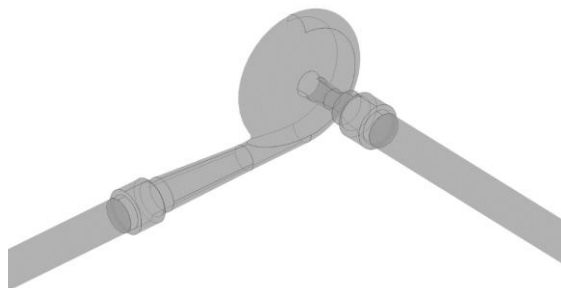


Рис. 1. Модель проточной части диода
Fig. 1. The model of the flow part of the diode

Для проведения численного эксперимента в данной работе использовались следующие модели турбулентности: k- ϵ , SST, RSM. Также использовалась ламинарная модель. Модели k- ϵ , SST, RSM относятся к методу, основанному на осреднении по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (Reynolds averaged Navie–Stokes или RANS). Модель k- ϵ является двухпараметрической моделью, в которой турбулентная вязкость высчитывается путем решения двух дополнительных уравнений: кинетической энергии турбулентности k и скорости диссипации турбулентности ϵ . Данная модель позволяет рассчитывать турбулентные течения с

приемлемой точностью, однако при моделировании отрывных течений точность расчетов оказывается низкой.

Модель SST сочетает в себе модели k- ϵ и k- ω . Для расчета течения свободного потока используются уравнения k- ϵ , а для расчета потока вблизи стенок – уравнения k- ω . Модель SST хорошо показывает себя в расчетах отрывных течений с небольшой зоной отрыва.

Модель RSM основана на уравнениях переноса компонентов тензора напряжений Рейнольдса и скоростей диссипации. Эти модели основаны не на гипотезе вихревой вязкости, а решают уравнения переноса напряжений Рейнольдса в жидкости. Уравнения переноса модели RSM решаются для компонентов напряжения по отдельности. Модели RSM хорошо описывают эффекты кривизны линий тока, внезапных изменений скорости (например, интенсивные вихревые потоки) по сравнению с моделями вихревой вязкости.

При моделировании ламинарных течений используется ламинарная модель и движение потока полностью описывается уравнениями RANS. Обычно условием применения ламинарной модели является низкое число Рейнольдса ($Re < 1000$). Передача энергии в жидкости в этом случае осуществляется молекулярным взаимодействием. В данной работе использование ламинарной модели связано с рекомендациями, приведенными в статье [17], в которой авторы аргументируют ее выбор ламинирующей структурой потока внутри вихревой камеры, однако отмечают некачественное описание течения в тангенциальном и осевом соплах диода.

Помимо модели турбулентности существенное влияние на результат моделирования оказывает значение шага по времени. Высокое значение шага по времени негативно повлияет на точность результатов моделирования, однако использование слишком малого значения шага приведет к чрезмерно высокому времени расчета. Оптимальные значения шага по времени для каждой из используемых моделей турбулентности определялись итерационным методом.

Также на точность расчетов оказывает влияние сетка. Для определения оптимального количества элементов сетки для каждой из используемых моделей турбулентности был проведен анализ сеточной сходимости. Результаты для модели турбулентности RSM в виде графика приведены на рис. 2. В результате анализа сеточной сходимости стало ясно, что для моделей k- ϵ и ламинарной может быть использована одна сетка, так же как и для моделей SST и RSM. Сетки, используемые для моделей k- ϵ и ламинарной, для моделей SST и RSM приведены на рис. 3 и 4 соответственно. Сетки состоят из тетраэдрических элементов с призматическим приграничным слоем.

Параметры моделирования при проведении численных экспериментов приведены в таблице.

На рис. 5 приведены поля скоростей для каждой из моделей в прямом направлении, а на рис. 6 – в обратном.

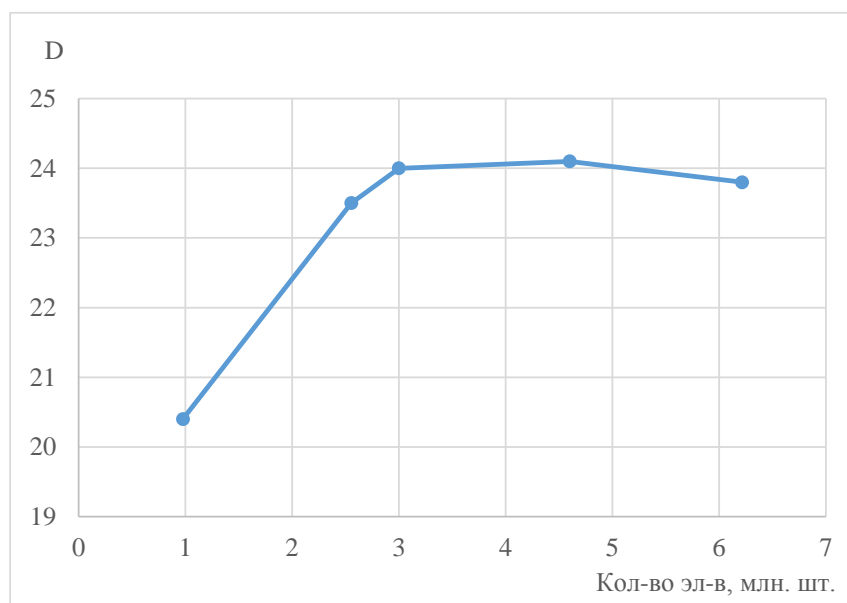


Рис. 2. Результат анализа сеточной сходимости для модели турбулентности RSM

Fig. 2. The result of the grid convergence analysis for the RSM

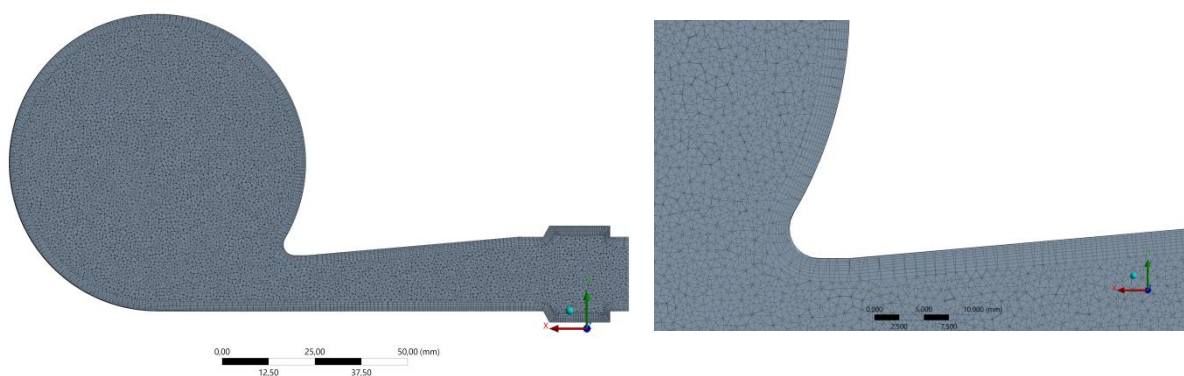


Рис. 3. Сетка, используемая при численном моделировании с моделью турбулентности k-ε и ламинарной моделью

Fig. 3. The grid used in numerical simulation with the k-ε turbulence model and the laminar model

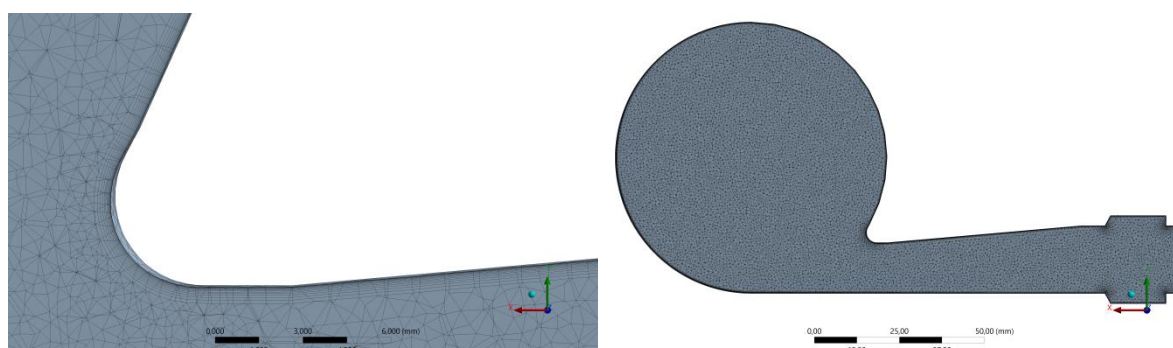


Рис. 4. Сетка, используемая при численном моделировании с моделями турбулентности SST и RSM

Fig. 4. The grid used in numerical simulations with SST and RSM turbulence models

Параметры численных экспериментов
Parameters of numerical experiments

Модель турбулентности	Шаг по времени (явный/мнимый), с	Количество элементов, млн	Размер первого пристеночного элемента, мм	Время счета одной расчетной точки, ч
Laminar	0,005	1,8	0,2	0,3
k-ε	0,002	1,8	0,2	0,5
SST	0,0001	3,2	0,005	2
RSM	0,00005	3,2	0,005	3

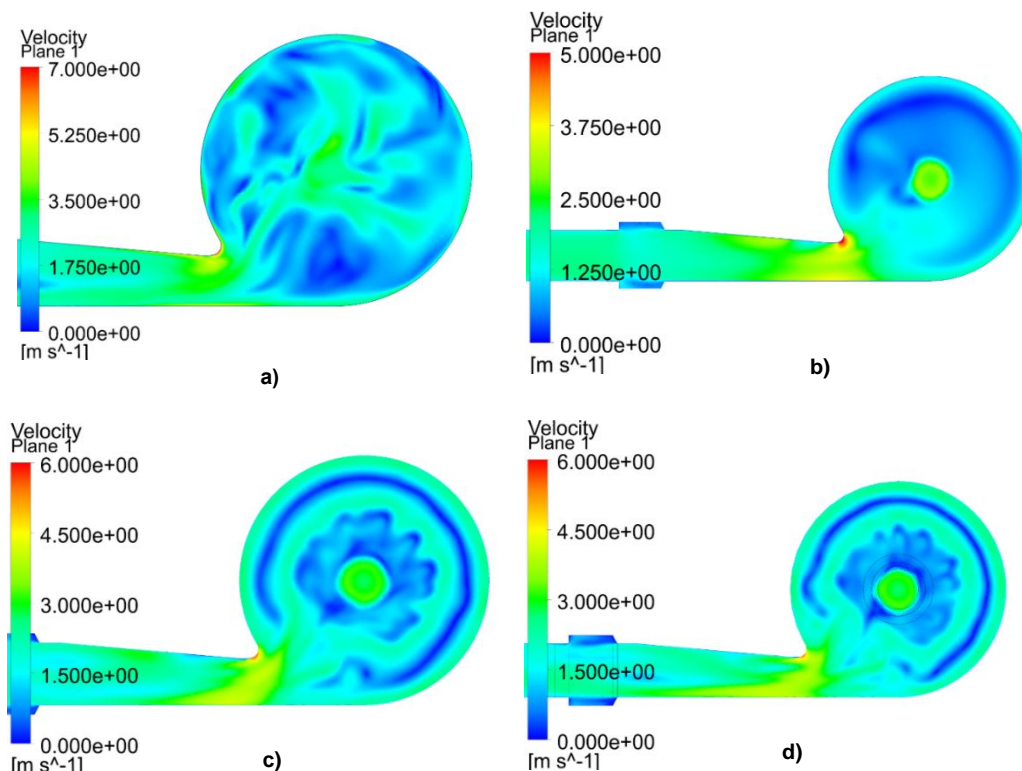


Рис. 5. Поля скоростей в прямом направлении: а) ламинарная модель; б) модель k-ε; в) модель SST; г) модель RSM

Fig. 5. Velocity fields in the forward direction: a) laminar model; b) k-ε model; c) SST model; d) RSM

На рис. 7 приведены поля давлений при движении потока жидкости в прямом направлении, а на рис. 8 – в обратном.

Для проверки адекватности результатов численного моделирования был поставлен физический эксперимент. Испытательный стенд показан на рис. 9, его принципиальная схема – на рис. 10. Центробежный насос Н (см. рис. 10) осуществлял подачу воды на испытываемый гидравлический диод ГД. Регулирование расхода воды осуществлялось регулируемым дросселем Д. Расход жидкости измерялся с помощью мерной емкости ЕМ. Перепады давлений на гидравлическом диоде измерялись с помощью манометра МН1, малые перепады измерялись с помощью U-образного дифференциального манометра МН2.

В качестве контрольно-измерительного оборудования использовались:

- манометр стрелочный (10 бар, класс точности 0,4);
- манометр U-образный (длина 1,5 м);
- мерная емкость и секундомер для измерения расхода.

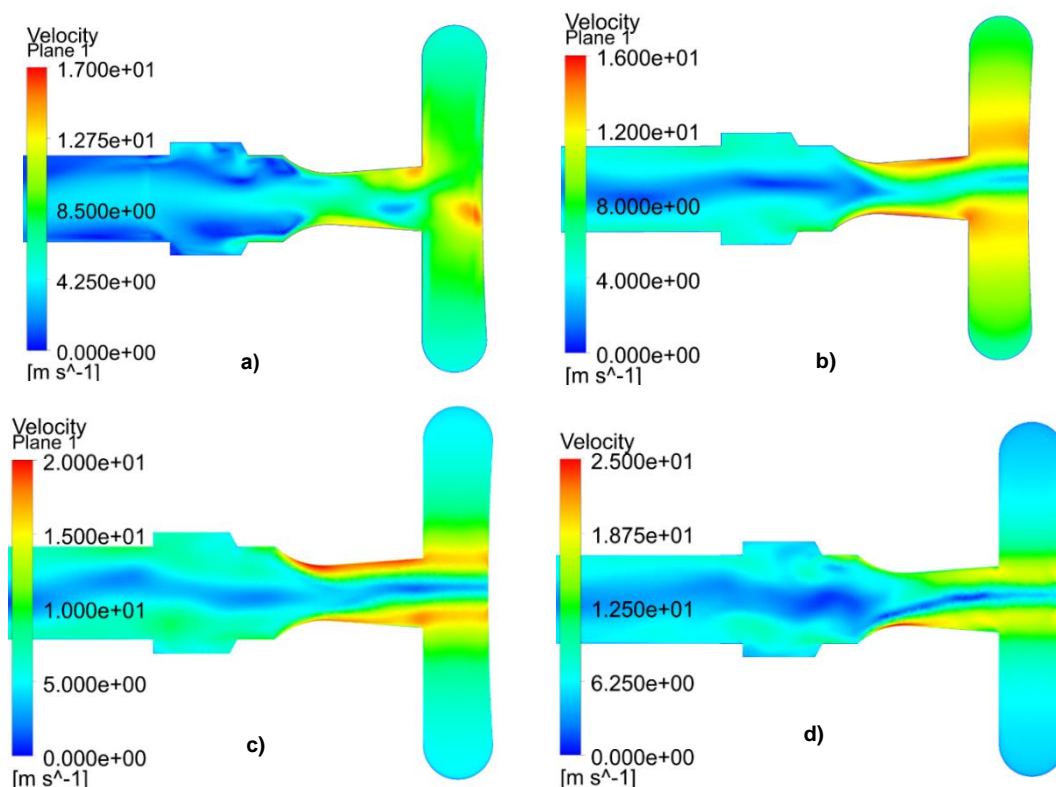


Рис. 6. Поля скоростей в обратном направлении: а) ламинарная модель; б) модель $k-\epsilon$; в) модель SST; д) модель RSM

Fig. 6. Velocity fields in the opposite direction: a) laminar model; b) $k-\epsilon$ model; c) SST model; d) RSM

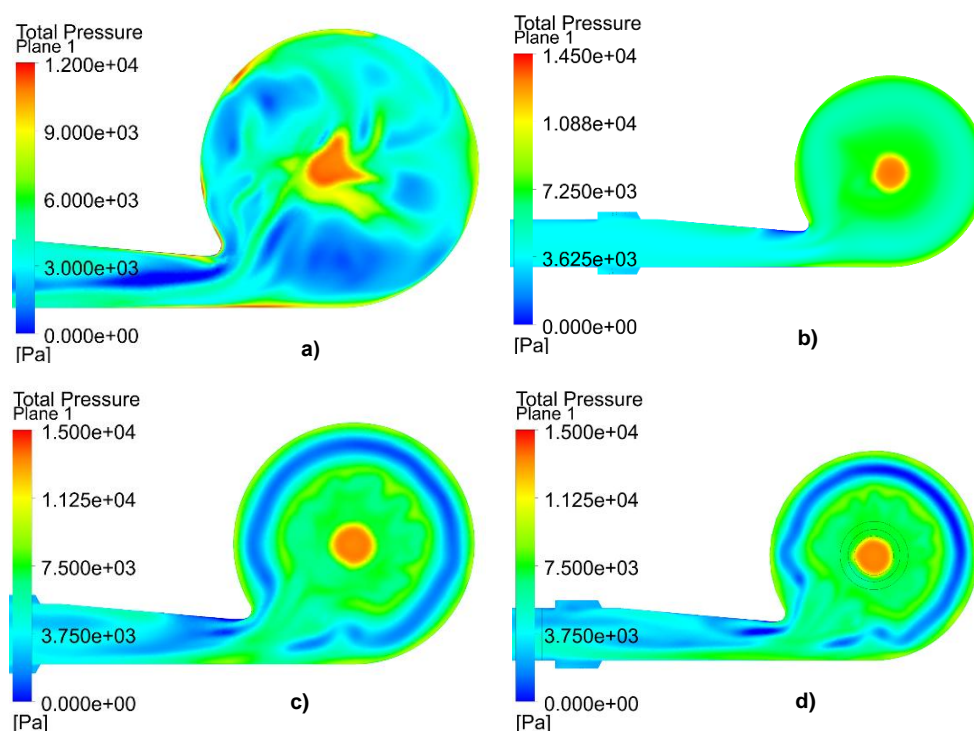


Рис. 7. Поля давлений в прямом направлении: а) ламинарная модель; б) модель $k-\epsilon$; в) модель SST; д) модель RSM

Fig. 7. Pressure fields in the forward direction: a) laminar model; b) $k-\epsilon$ model; c) SST model; d) RSM

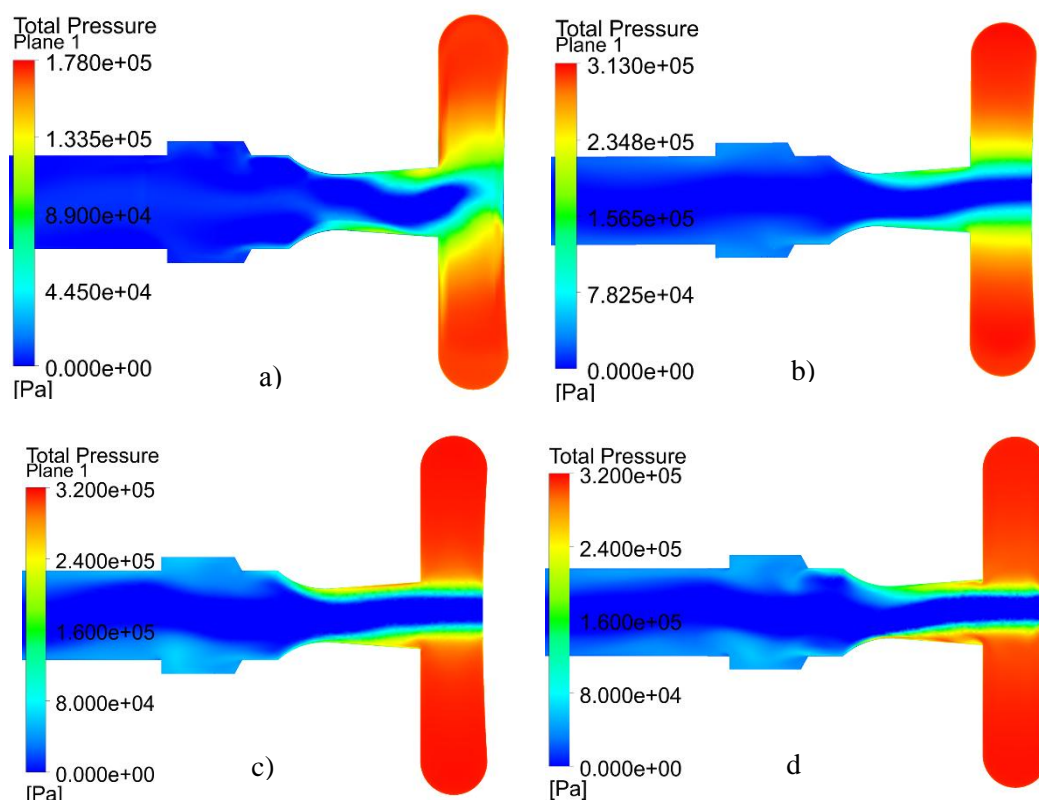


Рис. 8. Поля давлений в обратном направлении: а) ламинарная модель; б) модель к-ε; в) модель SST; д) модель RSM

Fig. 8. Pressure fields in the opposite direction: a) laminar model; b) k-ε model; c) SST model; d) RSM



Рис. 9. Стенд испытательный

Fig. 9. The test bench

Геометрические параметры испытываемого гидравлического диода были аналогичны параметрам, которые использовались при численных экспериментах. Диод был изготовлен методом 3D-печати с подготовкой внутренней поверхности проточной части для достижения минимальной ее шероховатости.

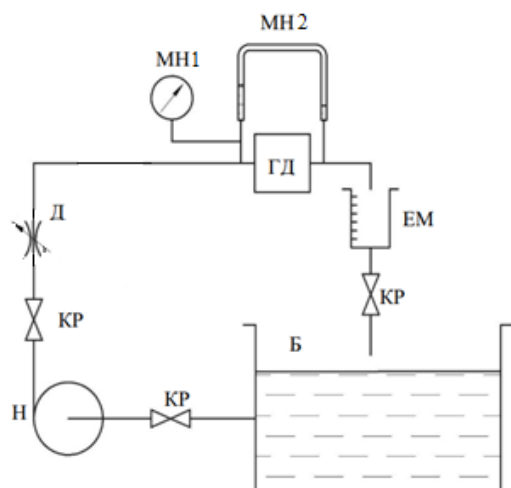


Рис. 10. Принципиальная схема испытательного стенда
Fig. 10. Schematic diagram of the test bench

На втором этапе эксперимента напорная линия насоса была подключена к осевому соплу гидравлического диода, а тангенциальный выход подключен к сливной линии, сообщающейся с атмосферой (прямое направление). Методика испытаний аналогична первому этапу.

Замеры для каждой из точек проводились не менее шести раз.

Результаты и обсуждения

В результате проведения численного моделирования и экспериментального исследования гидравлического диода были получены зависимости перепадов давлений на соплах гидравлического диода при прохождении потока жидкости в прямом и обратном направлениях от расхода жидкости. Графики зависимостей для численных и реального экспериментов приведены на рис. 11 и 12 в прямом и обратном направлениях соответственно. При этом для наглядного сравнения на данные физического эксперимента нанесены пределы погрешности 5 %.

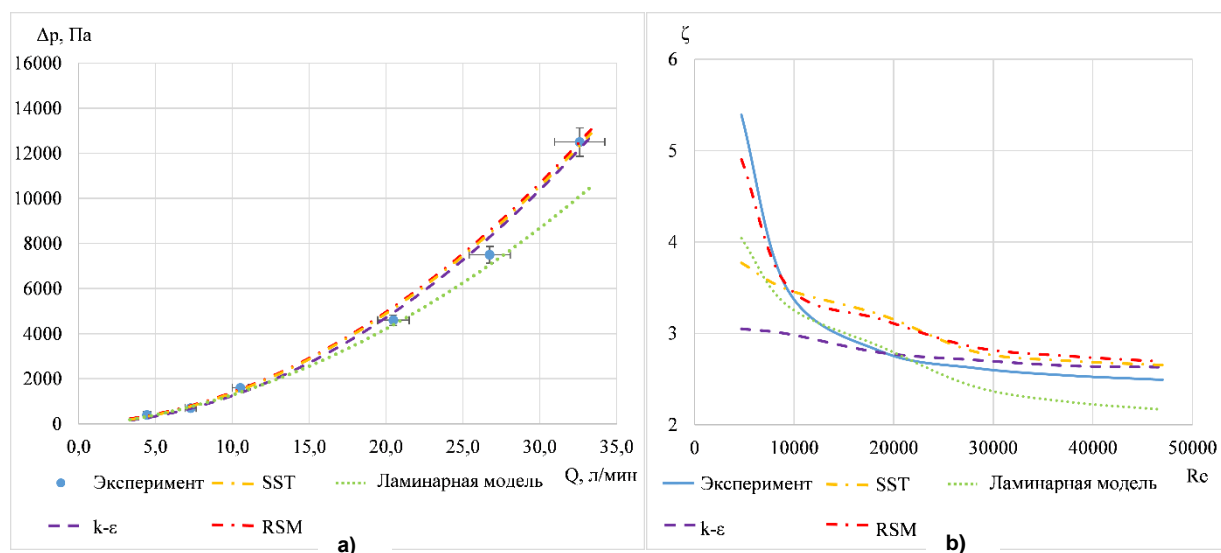


Рис. 11. Сравнение зависимостей, полученных в результате численного моделирования и физического эксперимента, для прямого направления диода: а) зависимость перепада давлений на диоде от расхода; б) зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса

Fig. 11. Comparison of dependencies obtained as a result of numerical modeling and physical experiment for the forward direction of the diode: а) dependence of the pressure drop on the diode on the flow rate; б) dependence of the hydraulic resistance coefficient on the Reynolds number

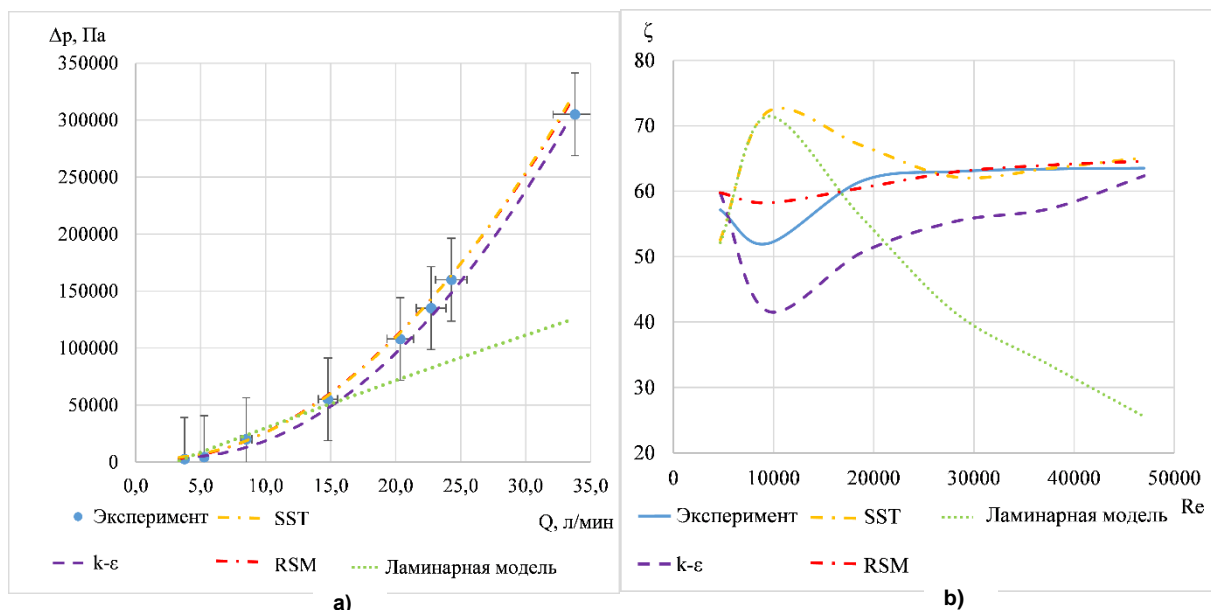


Рис. 12. Сравнение зависимостей, полученных в результате численного моделирования и физического эксперимента, для обратного направления диода: а) зависимость перепада давлений на диоде от расхода; б) зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса

Fig. 12. Comparison of dependencies obtained as a result of numerical modeling and physical experiment for the reverse direction of the diode: а) dependence of the pressure drop on the diode on the flow rate; б) dependence of the hydraulic resistance coefficient on the Reynolds number

По результатам численного моделирования и физического эксперимента рассчитана зависимость диодности исследуемого гидродиода от числа Рейнольдса, которая показана на рис. 13. При этом число Рейнольдса рассчитывалось по параметрам в поперечном сечении тангенциального сопла с наибольшим диаметром (входное сечение тангенциального сопла).

Как видно из рис. 11а и 11б, только модель турбулентности RSM описывает течение в прямом направлении диода с удовлетворительной точностью во всем диапазоне исследованных величин расхода и числа Рейнольдса. При этом модель ламинарного течения дает наименее точные результаты расчета и, как видно из рис. 5а, не позволяет получить качественного описания гидродинамической картины течения в прямом направлении диода при высоких значениях расхода жидкости. Модели турбулентности SST и k-ε применимы для моделирования потока жидкости в прямом направлении вихревого диода в области больших чисел Рейнольдса и позволяют получить точность результатов расчетов выше, чем при использовании RSM модели в этой области. Однако с уменьшением расходов и чисел Рейнольдса точность расчетов с применением моделей SST и k-ε снижается.

Данные на рис. 12а и 12б показывают, что модель турбулентности RSM также описывает течение в обратном направлении вихревого диода с удовлетворительной точностью во всем диапазоне исследованных величин расхода и числа Рейнольдса. При этом ламинарная модель и в обратном направлении диода не дает качественного описания течения, что также подтверждается гидродинамической картиной потока, показанной на рис. 6а. Модель турбулентности SST с удовлетворительной точностью позволяет моделировать течение жидкости в обратном направлении диода при больших расходах и числах Рейнольдса, а с их уменьшением точность моделирования снижается. Модель k-ε является наименее перспективной для использования в численном моделировании обратного потока в вихревом диоде ввиду сравнительно низкой точности результатов моделирования во всем исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса.

Анализ кривых на рис. 13 показывает, что применение модели турбулентности RSM при моделировании потоков в прямом и обратном направлениях вихревого диода позволяет рассчитать диодность по сопротивлению с наибольшей точностью по сравнению с другими моделями. При больших числах Рейнольдса модель SST показывает сопоставимые результаты расчета с результатами, полученными по модели RSM при моделировании потоков в обоих направлениях.

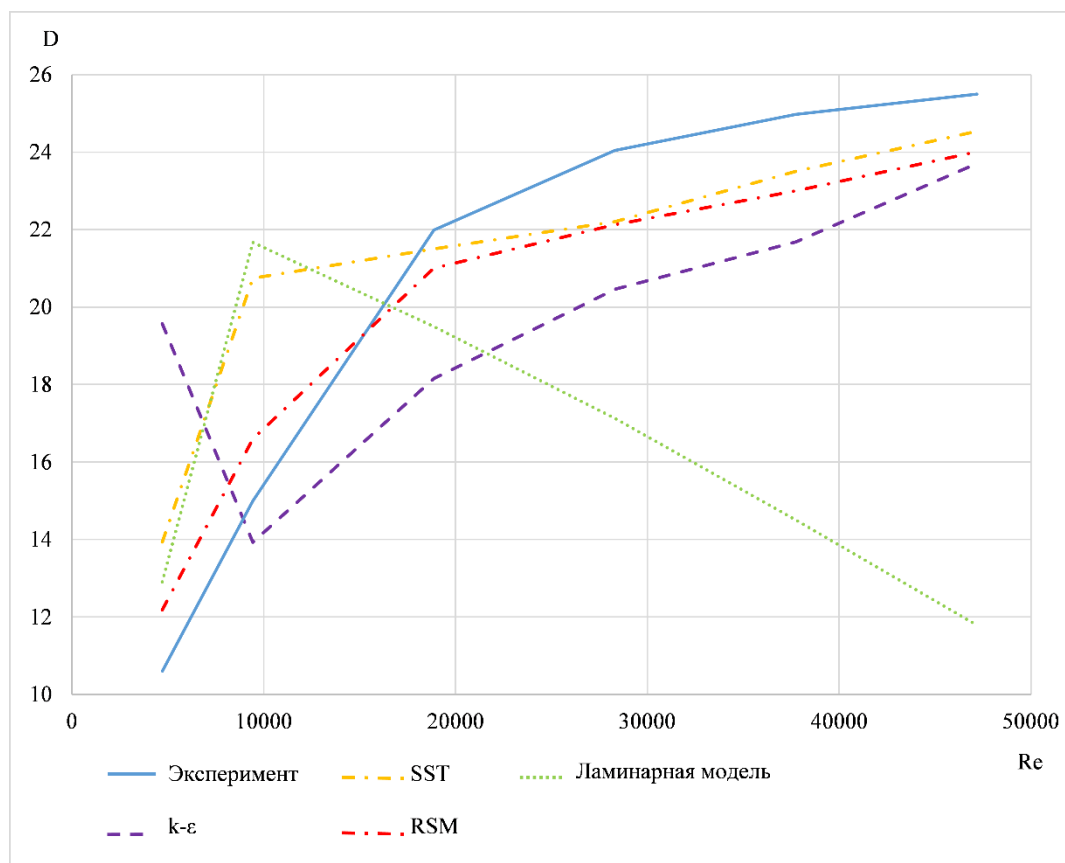


Рис. 13. Графики зависимости диодности от числа Рейнольдса
Fig. 13. The dependence of diodicity on the Reynolds number

Таким образом, использование модели турбулентности RSM позволяет моделировать течение жидкости в проточной части вихревого диода с высокой, по сравнению с другими рассмотренными моделями, точностью. Однако ввиду ее относительно высокой ресурсоемкости для предварительных расчетов видится оптимальным применение модели SST.

Список литературы

1. Syred N. A Review of Vortex Devices and Power Fluidics // Proceedings of the 3rd International Conference on Heat and Mass Transfer and Hydrodynamics in Swirling Flow, Moscow. 2008. P. 21–23.
2. Ranade V.V. Bhandari V.M. Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse. Oxford: Elsevier, 2014. 576 p. DOI: 10.1016/B978-0-08-099968-5.00001-5.
3. Паламарчук Н.В., Тимохин Ю.В., Соломин А.П. Защита высоконапорных трубопроводных систем и насосных установок от гидравлических ударов // Сборник научных трудов ДониЖТ. 2018. № 48. С. 46–60.
4. Burnett R., Caso D., Tang J. Fluidic Diode Development and Optimization. Department of Nuclear Engineering University of California, Berkeley. Report UCBTH-10-002, 2010. 36 p.
5. Yoder G.L., Elcassadgi Y., Leon G. De Vortex Diode Analysis and Testing for Fluoride Salt-Cooled High-Temperature Reactors. Reactor and Nuclear Systems Division of Oak Ridge National Laboratory. Report ORNL/TM-2011/425. 2011. 48 p.
6. Hydrodynamic cavitation using vortex diode: An efficient approach for elimination of pathogenic bacteria from water / P. Jain, V.M. Bhandari, K. Balapure, J. Jena, V.V. Ranade, D.J. Killedar // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 242. P. 210–219. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.04.057.
7. Ивашук И.А., Хабарова Д.Ф. Пути повышения энергоэффективности бесклапанных насосов с гидравлическими диодами // Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. XXV Международная научно-техническая конференция (г. Москва, 8 декабря 2021 г.): сборник материалов и докладов. М.: Мир науки, 2021. С 120–123.

8. Хабарова Д.Ф., Спиридонов Е.К. Экстремальные характеристики и расчет бесклапанных поршневых насосов с гидравлическими диодами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2018. № 55. С. 52–60. DOI: 10.15593/2224-9982/2018.55.06.
9. Спиридонов Е.К., Хабарова Д.Ф. Принципиальные схемы и характеристики бесклапанных насосов с вытеснителем возвратно-поступательного перемещения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 1(2). С. 309–313.
10. Whitesides G.M. The Origins and the Future of Microfluidics // Nature. 2006. Vol. 442. P. 368–373. DOI: 10.1038/nature05058.
11. Zimmerman W.B.J. Microfluidics: History, Theory and Applications. CISM International Centre for Mechanical Sciences (Vol. 466). Wien: Springer Science & Business Media, 2006. 301 p.
12. Khabarova D.F., Podzerko A.V., Spiridonov E.K. Experimental Investigation of Fluidic Diodes // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 93–98. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.443.
13. Yuelai D., Zhimin G., Jingwei L. Numerical Simulation of Flow Characteristics of Vortex Diode with Multi-tangential Tubes // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. Vol. 330 052008. DOI: 10.1088/1755-1315/330/5/052008.
14. Митрофанова О.В. Проблемы моделирования сложных вихревых течений // Труды седьмой российской национальной конференции по теплообмену: в 3 т. 2018. Т. 1. С. 32–35.
15. Волков К.Н. Моделирование крупных вихрей полностью развитого турбулентного течения в канале и сравнение моделей подсеточной вихревой вязкости // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47, № 3. С. 31–42.
16. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 368 с.
17. Kulkarni A.A., Ranade V. V. CFD simulation of flow in vortex diodes // AIChE Journal. 2008. Vol. 54, no. 5. P. 1139–1152. DOI: 10.1002/aic.11439.
18. Kulkarni A.A., Ranade V.V., Rajeev R., Koganti S.B. Pressure drop across vortex diodes: experiments and design guidelines // Chemical Engineering Science. 2009. Vol. 64. P. 1285–1292. DOI: 10.1016/j.ces.2008.10.060.
19. Разработка и исследование вихревого диода повышенной диодности для специальной техники военного назначения / И.В. Цветков, С.Ю. Кайгородов, Е.А. Павлюченко, А.К. Кузбанов // Вопросы оборонной техники. Технические средства противодействия терроризму. 2021. Серия 16. № 5–6. С. 131–142.
20. Yin J., Jiao L., Wang L. Large eddy simulation of unsteady flow in vortex diode // Nuclear Engineering and Design. 2010. Vol. 240. P. 970–974.
21. Pandare A., Ranade V.V. Flow in Vortex Diodes // Chemical Engineering Research and Design. 2015. Vol. 12. P. 274–285. DOI: 10.1016/j.cherd.2015.05.028.
22. Numerical Simulation of Flow Instability in Vortex Diodes / W. Junrong, X. Qi, K. Hanbing et al. // International Conference on Nuclear Engineering, 2017. ICONE25-66512, V008T09A015. DOI: 10.1115/ICONE25-66512.

References

1. Syred N. A Review of Vortex Devices and Power Fluidics. *Proceedings of the 3rd International Conference on Heat and Mass Transfer and Hydrodynamics in Swirling Flow*. Moscow, 2008, pp. 21–23.
2. Ranade V.V., Bhandari V.M. *Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse*. Oxford: Elsevier, 2014, 576 p. DOI: 10.1016/B978-0-08-099968-5.00001-5.
3. Palamarchuk N.V., Timokhin Yu.V., Solomin A.P. Protection of high-pressure pipeline systems and pumping units from hydraulic shocks. *Sbornik nauchnykh trudov DonIzht* [Collection of scientific papers of the Donetsk Institute of Railway Transport], 2018, no. 48. pp. 46–60. (In Russ.)
4. Burnett R., Caso D., Tang J. Fluidic Diode Development and Optimization. Department of Nuclear Engineering University of California, Berkeley. Report UCBTH-10-002, 2010. 36 p.

5. Yoder G.L., Elcassadgi Y., Leon G. De Vortex Diode Analysis and Testing for Fluoride Salt-Colled High-Temperature Reactors. Reactor and Nuclear Systems Division of Oak Ridge National Laboratory. Report ORNL/TM-2011/425. 2011. 48 p.
6. Jain P., Bhandari V.M., Balapure K., Jena J., Ranade V.V., Killedar D.J. Hydrodynamic cavitation using vortex diode: An efficient approach for elimination of pathogenic bacteria from water. *Journal of Environmental Management*, 2019, vol. 242, pp. 210–219. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.04.057.
7. Ivashchuk I.A., Khabarova D.F. Ways to improve energy efficiency of valveless pumps with hydraulic diodes. *Gidravlicheskie mashiny, gidroprivody i gidropnevmoavtomatika. XXV Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya* [Hydraulic machines, hydraulic drives and hydropneumatic automation. XXV International scientific and technical conference]. Moscow, 2021, pp. 120–123. (In Russ.)
8. Khabarova D.F., Spiridonov E. K. [Extreme characteristics and calculation of a valveless piston pump with fluidic diodes]. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Aerospace Engineering*, 2018, no. 55, pp. 52–60. DOI: 10.15593/2224-9982/2018.55.06. (In Russ.)
9. Spiridonov E. K., Khabarova D.F. Schematic diagrams and characteristics of valveless pumps with the displacer of reciprocating movement. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 18, no. 1(2), pp. 309–313. (In Russ.)
10. Whitesides G.M. The Origins and the Future of Microfluidics. *Nature*, 2006, vol. 442, pp. 368–373. DOI: 10.1038/nature05058.
11. Zimmerman W.B.J. *Microfluidics: History, Theory and Applications*. CISM International Centre for Mechanical Sciences (Vol. 466). Wien: Springer Science & Business Media, 2006. 301 p.
12. Khabarova D.F., Podzerko A.V., Spiridonov E.K. Experimental Investigation of Fluidic Diodes. *Procedia Engineering*, 2017. Vol. 206, pp. 93–98. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.443.
13. Yuelai D., Zhimin G., Jingwei L. Numerical Simulation of Flow Characteristics of Vortex Diode with Multi-tangential Tubes. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 330 052008. DOI: 10.1088/1755-1315/330/5/052008.
14. Mitrofanova O.V. Problems of modeling complex vortex flows. *Ced'maya rossiyskaya natsional'naya konferentsiya po teploobmenu v 3kh tomakh* [Proceedings of the seventh Russian national conference on heat transfer In 3 volumes]. Moscow, 2018, vol. 1, pp. 32–35. (In Russ.)
15. Volkov K.N. Modeling of large vortices of fully developed turbulent flow in the channel and comparison of models of subgrid vortex viscosity. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2006, vol. 47, no. 3, pp. 31–42. (In Russ.)
16. Volkov K.N., Emel'yanov V.N. *Modelirovanie krupnykh vikhrey v raschetakh turbulentnykh techeniy* [Large Eddy Modeling in Turbulent Flow Calculations]. Moscow, 2008. 368 p.
17. Kulkarni A.A., Ranade V.V. CFD simulation of flow in vortex diodes. *AIChE Journal*, 2008, vol. 54, no. 5, pp. 1139–1152.
18. Kulkarni A.A., Ranade V.V., Rajeev R., Koganti S.B. Pressure drop across vortex diodes: experiments and design guidelines. *Chemical Engineering Science*, 2009, vol. 64, pp. 1285–1292. DOI: 10.1016/j.ces.2008.10.060.
19. Tsvetkov I.V., Kaygorodov S.Yu., Pavlyuchenko E.A., Kuzbanov A.K. Development and research of a high-yield vortex hydrodiode for special military equipment. *Military Enginery Scientific and Technical Journal. Counter-terrorism technical devices*, 2021, iss. 16, no. 5–6, pp. 131–142. (In Russ.)
20. Yin J., Jiao L., Wang L. Nuclear Engineering and Design: Large eddy simulation of unsteady flow in vortex diode. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, vol. 240, pp. 970–974.
21. Pandare A., Ranade V.V. Flow in Vortex Diodes. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, vol. 12, pp. 274–285. DOI: 10.1016/j.cherd.2015.05.028.
22. Junrong W., Qi X., Hanbing K., Xu H., Shaodan L., Zhiguo W. Numerical Simulation of Flow Instability in Vortex Diodes. *International Conference on Nuclear Engineering*, 2017, ICONE25-66512, V008T09A015. DOI: 10.1115/ICONE25-66512

Информация об авторах

Гизбрехт Денис Геннадьевич, аспирант кафедры гидравлики и гидропневмосистем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; gizbdenis@gmail.com

Лазарев Илья Игоревич, аспирант кафедры гидравлики и гидропневмосистем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; lazarevii@susu.ru

Подзерко Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и гидропневмосистем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; podzerkoav@susu.ru

Information about the authors

Denis G. Gizbrekht, postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gizbdenis@gmail.com

Ilya I. Lazarev, postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; lazarevii@susu.ru

Aleksandr V. Podzerko, assistant professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic and Pneumatic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; podzerkoav@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.