

УДК 621.039-78

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.42.3.010](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.010)

Расчетное моделирование течения теплоносителя в каналах сложной формы при высоких параметрах среды

В.С. Росновский¹✉, С.В. Яуров¹, А.Д. Данилов², К.Ю. Гусев²

¹Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»,
Нововоронеж, Российская Федерация

²Воронежский государственный технический университет, Воронеж,
Российская Федерация

Резюме. Моделирование течения среды в каналах сложной формы в настоящее время невозможно представить без применения численных методов. Под сложностью формы следует понимать невозможность формульного задания функции, которая бы описывала изменение формы и площади живого сечения потока. Тем не менее каналы сложной формы представляют интерес для практического использования в различных областях промышленности. Частным случаем такого канала является гидравлический диод. Основной целью работы является расчетное моделирование течения среды в гидравлическом диоде при повышенных параметрах среды с помощью методов конечных элементов. Актуальность работы заключается в отсутствии экспериментальных исследований и примеров работы гидравлических диодов при повышенных параметрах среды. В работе смоделирован гидравлический диод по чертежам физика Николы Теслы. Параметры среды задавались следующие: давление 16 МПа, температура 298 °С. По результатам расчетов, отношение гидравлических сопротивлений при разных направлениях течения среды составило 19–23. Было выяснено, что гидравлический диод неприменим в качестве обратного клапана в технологических системах, поскольку неспособен полностью блокировать обратный поток. Так же было выявлено, что гидравлический диод с физической точки зрения эффективнее классических ограничителей течи, поскольку имеет усилие реакции струи в режиме «малая течь» 24,5 кН против 220 кН наиболее близкого по параметрам классического ограничителя течи. Результаты работы свидетельствуют о сложном характере эффективности гидравлических диодов, а также позволяют оценить параметры и характер течения среды в каналах сложной формы при повышенных параметрах среды, могут быть использованы для оптимизации будущих расчетов и моделирования гидравлических диодов для различных технологических систем.

Ключевые слова: гидравлический диод, диодность, клапан Теслы, усилие реакции струи, вставка-ограничитель течи.

Для цитирования: Росновский В.С., Яуров С.В., Данилов А.Д., Гусев К.Ю. Расчетное моделирование течения теплоносителя в каналах сложной формы при высоких параметрах среды. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(3) URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1387> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.010

Computational modeling of coolant flow in channels of complex shape at high medium parameters

V.S. Rosnovskii¹✉, S.V. Yaurov¹, A.D. Danilov², K.Y. Gusev²

¹The branch of “Concern Rosenergoatom” Novovoronezh Nuclear Power Plant 1,
Novovoronezh, the Russian Federation

²Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

Abstract. Nowadays, modeling the flow of a medium in channels of complex shape is impossible without the use of numerical methods. The complexity of the form should be understood as the

impossibility of a formulaic assignment of a function that would describe the change in the shape and area of the flow living section. Nevertheless, channels of complex shape are of interest for practical use in various fields of industry. A special case of such a channel is a hydraulic diode. The main purpose of the paper is the computational modeling of the flow of the medium in a hydraulic diode at elevated parameters of the medium by means of finite element methods. The relevance of the research lies in the absence of experimental studies and examples of the operation of hydraulic diodes at elevated environmental parameters. In this paper, a hydraulic diode is modeled according to the schematics by physicist Nikola Tesla. The parameters of the medium were set as follows: pressure 16 MPa, temperature 298 °C. As evidenced by the results of calculations, the ratio of hydraulic resistances at different directions of the medium flow was 19–23. It was found that the hydraulic diode is not applicable as a check valve in technological systems since it is not able to completely block the return flow. It was also demonstrated that the hydraulic diode is physically more effective than classical leak limiters because it has a jet reaction force in the "small leak" mode of 24.5 kN versus 220 kN of the closest classical leak limiter in terms of parameters. The results of the research indicate the complex nature of the efficiency of hydraulic diodes. They also made it possible to estimate the parameters and nature of the flow of the medium in channels of complex shape with increased parameters of the medium. They can be used to optimize future calculations and modeling of hydraulic diodes for various technological systems.

Keywords: hydraulic diode, diodicity, Tesla valve, jet reaction force, insert-leak limiter.

For citation: Rosnovskii V.S., Yaurov S.V., Belikov E.Y., Danilov A.D., Gusev K.Y. Computational modeling of coolant flow in channels of complex shape at high medium parameters. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1387> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.010 (In Russ.).

Введение

Моделирование течения среды в каналах сложной формы является сложной задачей и невозможно без применения численных методов. Невозможность точного определения функции живого сечения канала на всей его длине, разнообразие форм каналов и их особенностей не добавляют ясности в вопрос о методах расчета, эффективности и возможности применения таких каналов.

Цель работы заключается в моделировании течений среды при высоких параметрах потока в каналах сложной формы, формулировке выводов о закономерностях таких течений, возможности и эффективности применения таких каналов в различных промышленных системах. В данной статье моделируется частный случай канала сложной формы – гидравлический диод.

Гидравлический диод представляет собой канал, который создает большое сопротивление при обратном потоке жидкости и малое – при прямом. В конструкции отсутствуют движущиеся части. Для оценки его эффективности применяется понятие диодности. Существует два вида диодности. Диодность по расходу определяется как отношение расходов прямого и обратного потока при одинаковом перепаде давления. Диодность по сопротивлению – наоборот, отношением сопротивлений при равном расходе.

Первый гидравлический диод разработал Никола Тесла [1, 2]. Он назван в честь создателя «клапан Теслы». Чертеж этого диода приведен на Рисунке 1¹.

¹ Тесла Н.М. PATENT 1,329,559 VALVULAR CONDUIT. Нью-Йорк; 1920.

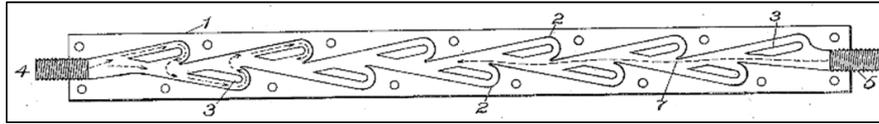


Рисунок 1 – Клапан Теслы
Figure 1 – Tesla Valve

Впоследствии были разработаны новые типы гидравлических диодов [3, 4], такие как диафрагменный диод [5]², диод с изогнутыми стенками [6], вихревой диод и др. Вихревой диод является наиболее изученным и применяется в конструкциях микронасосов [1]. Ведется анализ возможностей применения разных гидравлических диодов в конструкциях двигателей [7]. Исследования говорят, что теоретически рассчитанная диодность оказывается ниже определенной экспериментально [1, 8], также рассматривается вопрос о неравенстве результатов, полученных при разных моделях турбулентности [9]. Согласно некоторым исследованиям, диодность повышается с ростом числа Рейнольдса, после чего достигает плато и медленно снижается.

Актуальность работы заключается в том, что в настоящее время нет исследований, посвященных моделированию течения сред в гидравлических диодах при высоких параметрах потока / среды и их применению в технологических системах.

Материалы и методы

Для моделирования был выбран тип гидравлического диода «клапан Теслы». Создание расчетной модели проводилось в российском программно-техническом комплексе КОМПАС-3D.

В исследовании проводились 4 основных серии расчетов в программно-техническом комплексе ANSYS-CFX:

1) моделирование течения среды высоких параметров, определение диодности по сопротивлению с использованием модели турбулентности k-Epsilon, влияния числа зерен расчетной сетки;

2) определение влияния типа модели турбулентности на результаты вычислений;

3) определение диодности по расходу при различных перепадах давления и граничных условиях;

4) определение целесообразности применения клапана Теслы в качестве обратного клапана и вставки-ограничителя течи в технологических системах.

Геометрия гидравлического диода во всех сериях расчетов сохранялась одинаковой. Для определения диодности решались задачи для прямого и обратного направления потока.

Модель гидравлического диода строилась по чертежам Николы Теслы и документации классического обратного клапана на напоре насосов системы подпитки-продувки первого контура ВВЭР-1200³.

Проекция модели со стенками представлена на Рисунке 2.

² Болштынский А.П., Щерба В.Е., Носов Е.Ю., Кайгородов С.Ю. Гидравлический или пневматический диод [Патент]: RU2593919C1ю. Омск; 2015.

³ Затворы обратные. Технические условия. ТУ 3742-104-80841593-2012. ЗАО «ЗЭО Энергопоток». 2012. 45 с.

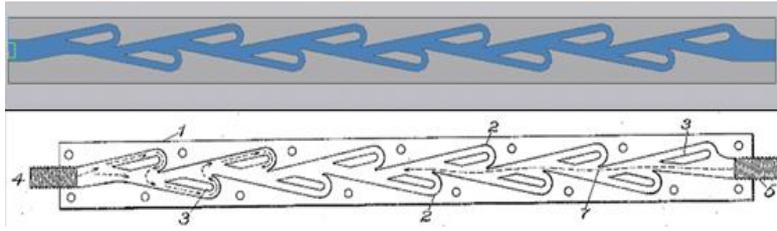


Рисунок 2 – Модель клапана Теслы
Figure 2 – Tesla Valve model

Изометрическое изображение представлено на Рисунке 3.

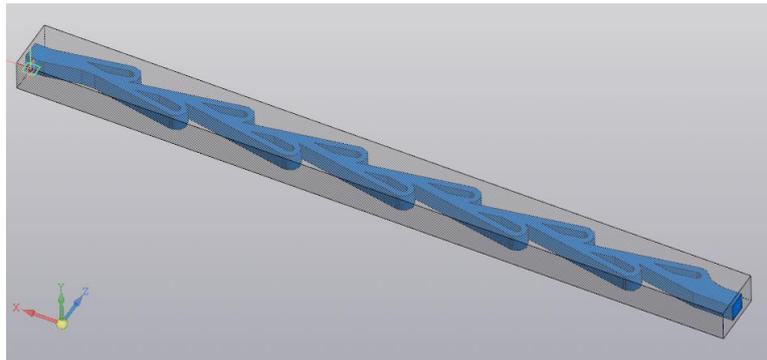


Рисунок 3 – Изометрический вид
Figure 3 – Isometric view

Высота бугорка шероховатости принималась равной 0,2 мм [10]. Учитывалась сила тяжести (направлена вдоль оси Y).

В ANSYS применяется метод конечных элементов: расчетная область разбивается на конечное число элементов (зерен расчетной сетки). Для расчета течений жидких и газообразных сред применяются тетраэдрические зерна, для более точного моделирования пограничного слоя область близкая к стенке канала дробится на меньшие зерна в несколько параллельных слоев (Рисунок 4).

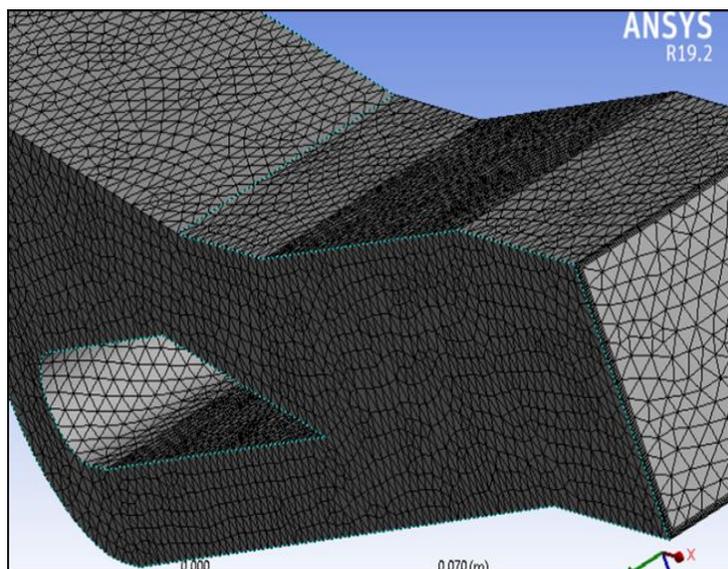


Рисунок 4 – Пример расчетной сетки
Figure 4 – Example of a calculation mesh

В каждом из зерен решаются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса:

$$\frac{\delta \vec{u}}{\delta t} = -(\vec{u} \times \nabla) \vec{u} + \nu \Delta \vec{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}, \quad (1)$$

где ∇ – оператор набла, t – время (с), \vec{u} – векторное поле скоростей (м/с), Δ – оператор Лапласа, ν – кинематическая вязкость ($\text{м}^2/\text{с}$), ρ – плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$), p – давление (Па), \vec{f} – векторное поле массовых сил ($\text{м}/\text{с}^2$).

Таким образом, модели турбулентности модифицируют исходные нестационарные уравнения Навье-Стокса путем введения усредненных и флуктуирующих величин для получения усредненного по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса. Эти уравнения представляют только средние величины расхода, моделируя эффекты турбулентности без необходимости разрешения турбулентных флуктуаций [11].

Модуль ANSYS-CFX использует сетку конечных элементов, для которой проводится числовой расчет значений для узлов сетки. Для сравнения, модуль ANSYS FLUENT использует сетку конечных объемов, в котором расчет числовых значений производится для центров зерен расчетной сетки, благодаря чему является менее точным.

Во второй серии расчетов определялся оптимальный для данной и аналогичных задач тип модели турбулентности:

1. В k-Epsilon модели k – кинетическая энергия турбулентности, дисперсия колебаний скорости. Она имеет размеры (L^2T^{-2}), например $\text{м}^2/\text{с}^2$. Модель k-Epsilon предполагает, что вязкость турбулентности связана с кинетической энергией и диссипацией турбулентности [11].

2. k-Omega, одним из преимуществ которой является расчет вблизи стенки с учетом низкого числа Рейнольдса. Модель не включает в себя сложные нелинейные функции демпфирования, необходимые для модели k-Epsilon, являясь поэтому более точной и надежной. Модель k-Omega изначально позволяла расширить диапазон параметров невязки стенки по сравнению с моделью k-Epsilon. Однако даже этого не всегда оказывалось достаточно для точного расчета. Из-за этого алгоритм плавно перешел от формы с низким числом Рейнольдса к формулировке функции стенки. В моделях предполагается, что вязкость турбулентности связана с кинетической энергией турбулентности и частотой турбулентности [11].

3. SST, основанная на уравнениях переноса для всех составляющих тензора напряжений и скорости диссипации. Эти модели не используют гипотезу вихревой вязкости, но решают уравнение для переноса напряжений в жидкости. Уравнения переноса напряжений решаются для отдельных компонентов напряжений. Алгебраические модели напряжений решают алгебраические уравнения для напряжений, тогда как дифференциальные напряжения определяются дифференциальными уравнениями переноса индивидуально для каждой составляющей напряжений. Точный срок расчета и особенности моделирования анизотропии напряжений теоретически делают SST модель наиболее подходящей для сложных течений, однако практика показывает, что они часто не превосходят моделей с двумя уравнениями (k-Epsilon, k-Omega) [11].

Результаты

1) В первой серии расчетов были получены следующие результаты (Таблица 1):

Таблица 1 – Результаты первой серии расчетов
Table 1 – Results of the first series of calculations

| Модель турбулентности | Массовый расход, кг/с | Число зерен | Тип потока | Сопротивление | Диодность |
|-----------------------|-----------------------|-------------|------------|---------------|-----------|
| k-Epsilon | 21,916 кг/с | 1168000 | прямой | 85,74 кПа | 22,635 |
| k-Epsilon | 21,916 кг/с | 1168000 | обратный | 1,9407 МПа | |
| k-Epsilon | 21,916 кг/с | 11742000 | прямой | 85,879 кПа | 19,075 |
| k-Epsilon | 21,916 кг/с | 11742000 | обратный | 1,635 МПа | |

Условия на входе: 16,2 МПа, 66,5 °С. На выходе: 21,916 кг/с.
Дальнейшие вычисления проводились для 11742000 зерен.
На Рисунке 5 представлены линии тока при обратном потоке.

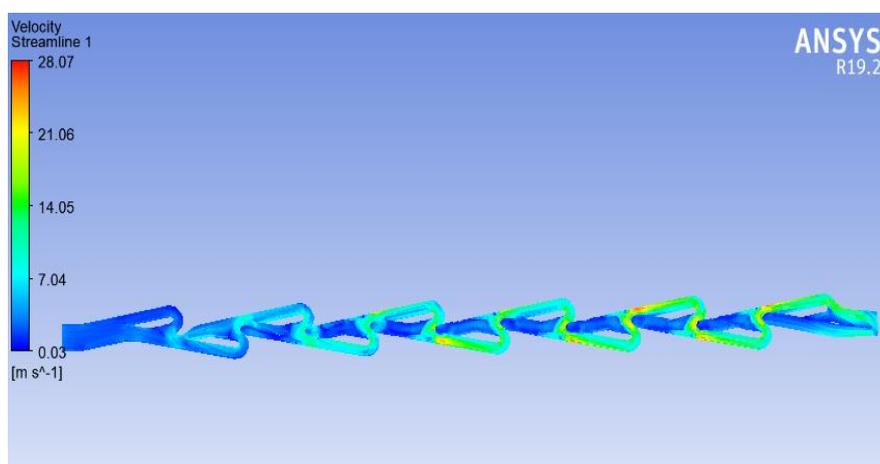


Рисунок 5 – Линии тока при обратном потоке
Figure 5 – Reverse flow lines

На Рисунке 6 представлены линии тока при прямом потоке.

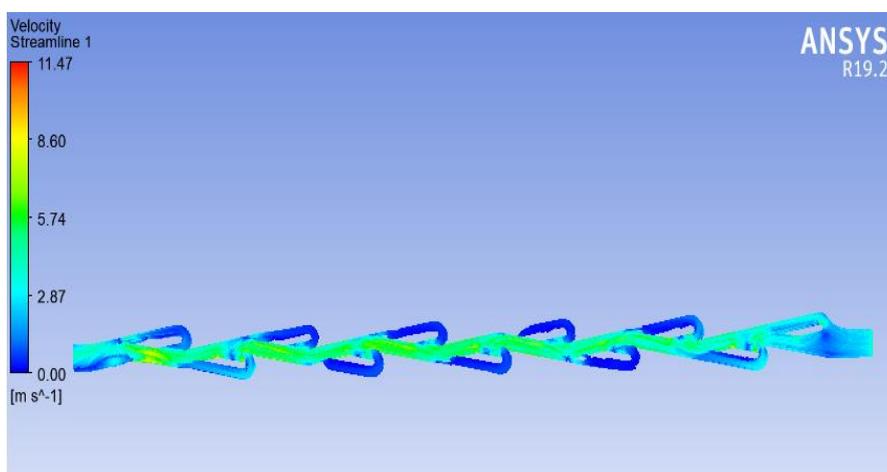


Рисунок 6 – Линии тока при прямом потоке
Figure 6 – Direct flow lines

2) Во второй серии расчетов были получены следующие результаты (Таблица 2):

Таблица 2 – Результаты второй серии расчетов
Table 2 – Results of the second series of calculations

| Модель турбулентности | Массовый расход | Диодность |
|-----------------------|-----------------|-----------|
| k-Epsilon | 21,916 кг/с | 19,075 |
| k-Omega | 21,916 кг/с | 23,19 |
| SST | 21,916 кг/с | 23,08 |

Граничные условия задавались такие же, как и в первой серии расчетов.
В дальнейших вычислениях использовалась модель турбулентности k-Omega.

3) В третьей серии расчетов были получены следующие результаты (Таблица 3):

Таблица 3 – Результаты третьей серии расчетов
Table 3 – Results of the third series of calculations

| Перепад давления | Тип потока | Расход | Диодность по расходу |
|------------------|------------|-------------|----------------------|
| 0,5 МПа | Прямой | 48,3 кг/с | 4,178 |
| | Обратный | 11,56 кг/с | |
| 1 МПа | Прямой | 68,318 кг/с | 3,816 |
| | Обратный | 16,59 кг/с | |
| 2 МПа | Прямой | 96,63 кг/с | 4,18 |
| | Обратный | 23,09 кг/с | |

Значение опорного давления не влияло на результаты расчета.

4) Для четвертой серии расчетов модели создавались отдельно.

Моделировалась работа клапанов Теслы в условиях срабатывания классических обратных клапанов в связке трех парольных насосов, один из которых находится в работе (отказ насоса и опрокидывание потока). Результаты представлены на Рисунке 7.

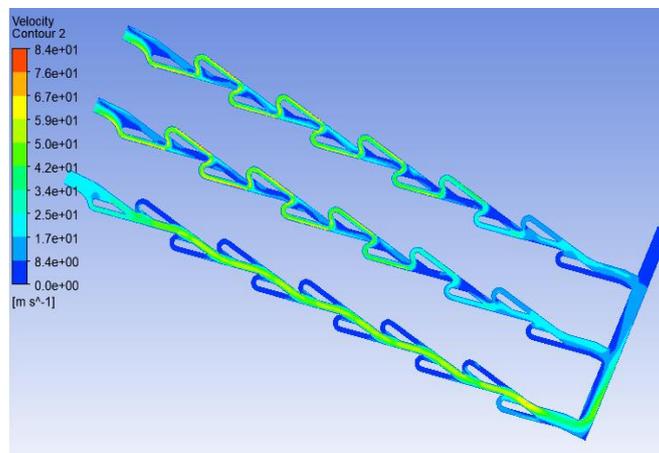


Рисунок 7 – Клапан Теслы в качестве обратного клапана
Figure 7 – Tesla valve as a check valve

Клапан Теслы не полностью запирает обратный поток, применение его в качестве обратного клапана неприемлемо.

Авторы провели расчетный анализ режимов работы клапана Теслы в качестве ограничителя течи. Для оценки применимости клапана Теслы в качестве ограничителя течи было построено две модели, представленные на Рисунке 8.

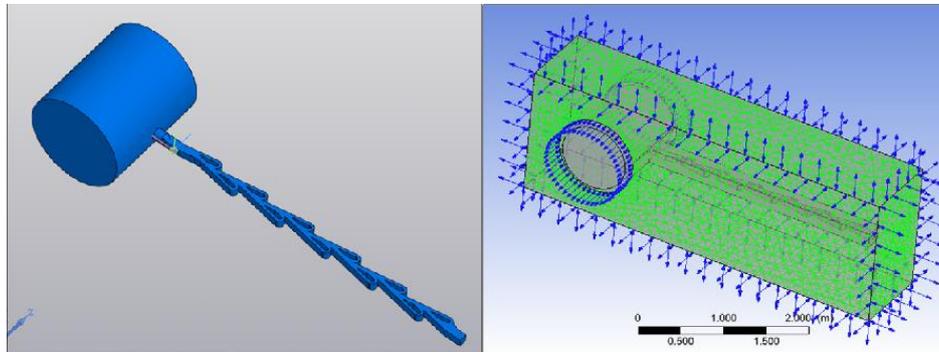


Рисунок 8 – Клапан Теслы в качестве ограничителя течи
 Figure 8 – Tesla valve as a leak limiter

Левая модель использовалась для расчета режима подпитки (клапан Теслы выполняет эту функцию). Правая модель построена на основе левой, но с объемом воздуха вокруг участка основного трубопровода и клапана Теслы. Эта модель демонстрирует работу клапана Теслы в режиме малой течи, когда происходит разрыв врезанного в основной трубопровод трубопровода меньшего диаметра, расположенного за клапаном Теслы, и среда устремляется в объем воздуха. Для этой модели проводился двухфазный расчет при значениях давления и температуры среды в трубопроводах 16 МПа и 298 °С соответственно, при этом давление и температура воздуха равнялись 0,1 МПа и 30 °С. Принята модель турбулентности SST, поскольку среда двухфазная.

Результаты расчета правой модели приведены на Рисунке 9.

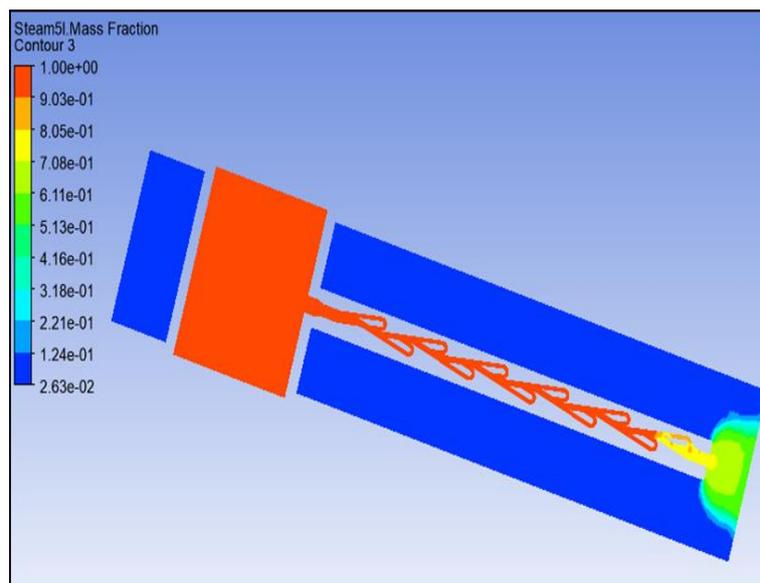


Рисунок 9 – Контур влагосодержания в режиме малой течи
 Figure 9 – Moisture content contour in low leak mode

В режиме малой течи среда вскипает на 11-й лопасти клапана Теслы, что, помимо эффекта диодности, дополнительно препятствует утечке среды из основного трубопровода. Расход утечки составил 46,117 кг/с. Скорость истечения находится в диапазоне 228–532 м/с.

Для оценки эффективности вставок-ограничителей течи используется формула:

$$R = G \times W. \quad (2)$$

R – усилие реакции струи (Н), G – массовый расход (кг/с), W – скорость истечения среды (м/с). Таким образом, усилие реакции струи клапана Теслы лежит в диапазоне от 10,5 до 24,5 кН.

Обсуждение

В первой серии расчетов смоделировано течение среды высоких параметров в гидравлическом диоде сложной формы. Результаты наглядно демонстрируют природу явления диодности. В прямом направлении среда течет по центральному каналу, словно в обычной трубе, поскольку потери давления на лопастях значительно выше, чем в центральном канале. В противоположном направлении – наоборот, среда течет по обводным каналам, испытывая изменения направления, завихрения после каждой лопасти, большие потери давления. Увеличение числа зерен расчетной сетки практически не влияет на результат вычисления прямого потока (поскольку его можно считать стационарным), но приводит к сильному уменьшению рассчитанного сопротивления при обратном потоке, вероятно, из-за более точного моделирования пограничного слоя.

Во второй серии расчетов установлено, что модель турбулентности практически не влияет на результат вычисления прямого потока (вероятно, потому что его можно считать безвихревым и стационарным), при этом переход к более точным моделям приводит к сильному увеличению сопротивления обратному потоку и, соответственно, росту диодности. Вероятно, это происходит из-за большей точности моделирования вихрей. Замечено, что результаты расчетов по моделям k - Ω и SST почти совпадают, однако расчеты по модели k - Ω идут быстрее и требуют меньшего числа итераций для достижения стабильного параметра невязки.

Результаты оценки диодности по расходу в третьей серии расчетов соответствуют зарубежным исследованиям и находятся на уровне 4. Однако диодность по расходу наиболее важна для оценки диодов в составе микронасосов малых параметров, так как наиболее важен именно расход. В промышленных установках, вероятно, наиболее важна диодность по сопротивлению, так как давление будет определять соблюдение различных пределов напряжений оборудования и экономичность системы в целом.

В четвертой серии расчетов установлено, что клапан Теслы не полностью запирает обратный поток и не может быть применен в качестве обратного клапана в составе технологических систем.

Усилие реакции струи наиболее близкого по параметрам ограничителя течи составляет 220 кН, что примерно в 10 раз больше (а значит, хуже), чем у клапана Теслы на схожих параметрах среды. Это означает, что клапан Теслы приблизительно втрое сильнее снижает расход утечки теплоносителя при разрывах трубопроводов с высокими параметрами среды, что, в свою очередь, является преимуществом.

Заключение

В данной работе произведено расчетное моделирование течения теплоносителя в каналах сложной формы при высоких параметрах среды на примере гидравлического диода типа «клапан Теслы». Определены характеры прямого и обратного течений, эффективность гидравлического диода.

Результаты оценок различных моделей турбулентности и величины зерен расчетной сетки могут быть использованы для оптимизации вычислений в будущих исследованиях данной темы. Рассмотрена возможность применения гидравлических диодов в составе технологических систем с высокими параметрами среды. Установлено, что клапан Теслы может увеличить время истечения среды (как вставка-ограничитель течи) в случаях разрыва трубопроводов, что, в свою очередь, увеличивает время для выполнения каких-либо мер по локализации разрывов трубопроводов.

Для оценки эффективности клапана Теслы в качестве ограничителя течи необходимы дальнейшие исследования. Авторы также считают важным определение влияния геометрии клапана Теслы на его эффективность, исследование характера течений и диодности в сложном канале во всех спектрах давлений и температур, построение новых моделей, основанных на модели клапана Теслы, и моделирование их применения в различных технологических системах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хабарова Д.Ф. Гидродинамика рабочего процесса и расчет характеристик бесклапанных поршневых насосов с гидродиодами. Челябинск; 2019. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008591346/ [дата обращения: 08.06.2023].
2. Лебедев И.В., Трескунов С.Л., Яковенко В.С. *Элементы струйной автоматики*. М.: Машиностроение; 1973. 360 с.
3. Priestman G.H. A study of vortex throttles Part 1: Viscid flow analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 1987;201(5):337–343. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1987_201_132_02.
4. Kulkarni A.A., Ranade V.V., Rajeev R. Pressure drop across vortex diodes: Experiments and design guidelines. *Chemical Engineering Science*. 2009;64(6):1285–1292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.10.060>.
5. Шаповал Л.А. Расчет, проектирование и исследование бесклапанного поршневого насоса с гидравлическими диодами. Челябинск; 2017. URL: https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/17525/2017_266_shapovall_a.pdf?sequence=1&isAllowed=y [дата обращения: 08.06.2023].
6. Оверко М.В. Обоснование рациональных параметров рабочих процессов и областей применения перспективных средств защиты водонапорных установок от гидравлических ударов. Псков; 2016. URL: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=SH47Us0AAAAJ&citation_for_view=SH47Us0AAAAJ:2P1L_qKh6hAC [дата обращения: 08.06.2023].
7. Кайгородов С.Ю., Шапошков А.А., Цветков И.В. Методика расчета применения сопловых гидродиодов в конструкции двухтрубного гидравлического амортизатора. *Омский научный вестник*. 2020;4:82–89. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-82-89.
8. Yoder G.L., Elcassadgi Y., De Leon G. Vortex diode analysis and testing for fluoride salt cooled high-temperature reactors. *UT-Battelle*. 2011:ORNL-27(4-00). DOI: 10.2172/1036568.
9. Pandare A.K., Ranade V.V. Flow in vortex diodes. 2015:102:274–285. DOI: 10.1016/j.cherd.2015.05.028.

10. Вильнер Я.М., Ковалев Я.Т., Некрасов Б.Б. *Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам*. Минск: Высшая школа; 1976. 416 с.
11. *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*. Canonsburg, 2011. 402 p.

REFERENCES

1. Habarova D.F. Hydrodynamics of the working process and calculation of characteristics of valveless piston pumps with hydrodiodes. Cheljabinsk; 2019. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008591346/ (accessed on 08.06.2023). (In Russ.).
2. Lebedev I.V., Treskunov S.L., Jakovenko V.S. *Elements of jet automation*. Moscow, Mechanical engineering; 1973. 360 p. (In Russ.).
3. Priestman G.H. A study of vortex throttles Part 1: Viscid Flow Analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 1987;201(5):337–343. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1987_201_132_02.
4. Kulkarni A.A., Ranade V.V., Rajeev R. Pressure drop across vortex diodes: Experiments and design guidelines. *Chemical Engineering Science*. 2009;64(6):1285–1292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.10.060>.
5. Shapoval L.A. Calculation, design and research of a valveless piston pump with hydraulic diodes. Cheljabinsk; 2017. URL: https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/17525/2017_266_shapovalla.pdf?sequence=1&isAllowed=y (accessed on 08.06.2023). (In Russ.).
6. Overko M.V. Substantiation of rational parameters of work processes and areas of application of promising means of protection of water-pressure installations from hydraulic shocks. Pokrovsk; 2016. URL: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=SH47Us0AAAAJ&citation_for_view=SH47Us0AAAAJ:2P1LqKh6hAC (accessed on 08.06.2023). (In Russ.).
7. Kajgorodov S.Ju., Shaposhkov A.A., Cvetkov I.V. The method of calculating the use of nozzle hydrodiodes in the design of a two-tube hydraulic shock absorber. *Omskij nauchnyj vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2020;4:82–89. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-82-89 (In Russ.).
8. Yoder G.L., Elcassadgi Y., De Leon G. Vortex diode analysis and testing for fluoride salt cooled high-temperature reactors. *UT-Battelle*. 2011:ORNL-27(4-00). DOI: 10.2172/1036568.
9. Pandare A.K., Ranade V.V. Flow in vortex diodes. 2015;102:274–285. DOI: 10.1016/j.cherd.2015.05.028.
10. Vil'ner Ja.M., Kovalev Ja.T., Nekrasov B.B. *Reference manual on hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives*. Minsk, Vyshejskaja shkola; 1976. 416 p. (In Russ.).
11. *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*. Canonsburg; 2011. 402 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Росновский Виктор Сергеевич, оператор реакторного отделения, Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», Нововоронеж, Российская Федерация.

e-mail: rosnovskyviktor@yandex.ru

ORCID: [0009-0003-1800-7446](https://orcid.org/0009-0003-1800-7446)

Viktor Sergeevich Rosnovskii, Reactor Compartment Operator, the branch of “Concern Rosenergoatom”, Novovoronezh Nuclear Power Plant 1, Novovoronezh, the Russian Federation.

Яуров Сергей Васильевич, главный технолог, Филиал АО «Концерн

Sergey Vasilevich Yaurov, Chief Technologist, the branch of “Concern Rosenergoatom”,

Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», Нововоронеж, Российская Федерация.

e-mail: yaurovsv@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Данилов Александр Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: danilov-ad@yandex.ru

ORCID: [0000-0002-1534-5285](https://orcid.org/0000-0002-1534-5285)

Novovoronezh Nuclear Power Plant 1, Novovoronezh, the Russian Federation.

Aleksandr Dmitrievich Danilov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

Гусев Константин Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: gussev_konstantin@mail.ru

ORCID: [0000-0002-0517-5737](https://orcid.org/0000-0002-0517-5737)

Konstantin Yurievich Gusev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 11.06.2023; одобрена после рецензирования 17.07.2023; принята к публикации 07.08.2023.

The article was submitted 11.06.2023; approved after reviewing 17.07.2023; accepted for publication 07.08.2023.