

РАЗРАБОТКА И РАСЧЁТНЫЙ АНАЛИЗ ВОЛНОВОГО ГИДРОДИОДА С ПРОФИЛЕМ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ НА ОСНОВЕ КУБИЧЕСКИХ СПЛАЙНОВ

С. Ю. Кайгородов 

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

 Sergey7-2005@mail.ru

В статье был предложен волновой гидродiode — пассивное гидравлическое устройство, в котором периодическое изменение полузазора вдоль канала формирует различие гидравлических сопротивлений в прямом и обратном направлениях течения.

Профиль проточной части задан кубическим сплайном. Геометрия полностью определяется тремя независимыми параметрами: минимальным полузазором, полузазором в точке сшивки и относительной координатой точки сшивки. Численное моделирование выполнено методами вычислительной гидродинамики Computational Fluid Dynamics на основе стационарных осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса и модели турбулентности $k-\omega$. Дифференциально-геометрический анализ показал, что нулевая четвёртая производная кубического сплайна внутри каждого полиномиального участка ограничивает воспроизведение резких разрывов кривизны, необходимых для эффективного вихревого запираания потока.

Полученные результаты демонстрируют, что сплайновая параметризация эффективна для плавных профилей, сокращая число варьируемых переменных, но требует замены на дискретные модели для геометрий с локальной агрессивностью кромок. Итоги исследования закладывают основу для многокритериальной топологической оптимизации пассивных запорных устройств ядерных реакторов.

Ключевые слова: гидродiode, волновой канал, кубический сплайн, турбулентная диссипация, диодность, CFD-моделирование, дифференциальная геометрия, пассивные системы безопасности

Для цитирования: Кайгородов С. Ю. Разработка и расчётный анализ волнового гидродиода с профилем проточной части на основе кубических сплайнов // Омский научный вестник. 2026. № 3 (199). С. 31—38. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-31-38>. EDN: WVRGRQ.



© Кайгородов С. Ю., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

DEVELOPMENT AND COMPUTATIONAL ANALYSIS OF A WAVE HYDRODIODE WITH A FLOW PATH PROFILE BASED ON CUBIC SPLINES

S. Yu. Kaigorodov 

Omsk State Technical University, Mira Ave., 11, Omsk, 644050, Russia

 Sergey7-2005@mail.ru

The article introduces a wave hydrodiode — a passive hydraulic device in which periodic variation of the half-gap along the channel creates a difference in hydraulic resistance between forward and reverse flow directions.

The profile of the flow section is defined by a cubic spline. The geometry is fully determined by three independent parameters: the minimum half-gap, the half-gap at the splice point, and the relative coordinate of the splice point. Numerical simulation is performed using Computational Fluid Dynamics methods based on steady-state Reynolds-averaged Navier—Stokes equations and the $k-\omega$ turbulence model. Differential-geometric analysis has shown that the zero fourth derivative of the cubic spline within each polynomial segment limits the reproduction of sharp curvature discontinuities necessary for effective vortex-based flow

blocking. The obtained results demonstrate that spline parameterization is effective for smooth profiles, reducing the number of variable parameters, but requires replacement with discrete models for geometries with local edge aggressiveness. The findings lay the groundwork for multi-criteria topological optimization of passive shut-off devices for nuclear reactors.

Keywords: hydrodiode, wave channel, cubic spline, turbulent dissipation, diodicity, CFD simulation, differential geometry, passive safety systems

For citation: Kaigorodov S. Yu. Development and computational analysis of a wave hydrodiode with a flow path profile based on cubic splines. *Omsk Scientific Bulletin*. 2026;3(199):31–38. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2026-199-31-38>. EDN: WVRGRQ. (In Russ.).



© Kaigorodov S. Yu., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Гидродiodы — пассивные гидравлические устройства с существенно различным сопротивлением в прямом и обратном направлениях потока. Количественной мерой этого свойства служит диодность D — отношение массового расхода в прямом направлении к массовому расходу в обратном при одинаковом перепаде давления Δp . Гидродiodы применяются в системах аварийного расхолаживания ядерных реакторов, контурах естественной циркуляции, системах отвода остаточного тепла DRACS (Direct Reactor Auxiliary Cooling System — вспомогательная система расхолаживания реактора) и гидравлических приводах, где требуется преимущественное течение теплоносителя без подвижных частей [1, 2]. В проектах реакторов SFR (Sodium-Cooled Fast Reactor — быстрый реактор с натриевым теплоносителем) и FHR (Fluoride-Salt-Cooled High-Temperature Reactor — высокотемпературный реактор с фторидным теплоносителем) гидродiodы подавляют паразитные обратные токи при авариях LOFC (Loss Of Forced Circulation — потеря принудительной циркуляции) [3, 4].

В литературе сформировалось несколько классов гидродiodов [5–13]. Конфузорно-диффузорные элементы используют чередование сужающихся (конфузор) и расширяющихся (диффузор) участков и обычно дают $D < 1,5$ [12]. Лабиринтные схемы образуют путь потока в виде «змейки» с резкими поворотами, что повышает потери давления в прямом направлении [13]. Вихревые диоды — устройства с камерой закручивания и тангенциальным подводом потока — способны давать D до 12 и выше [9]. Клапаны Тесла — пассивные канальные элементы с последовательными петлевыми каналами — линейны и компактны, однако их стационарная диодность обычно составляет 1–2 [10]. Значение $D > 2$ достигается либо многоступенчатыми схемами [8], либо нестационарными пульсирующими режимами [6].

Общая проблема дискретных конструкций — большое число геометрических переменных: форма канала задаётся координатами десятков пластин, что затрудняет прямую оптимизацию [14], хотя в современных работах для обхода этих трудностей успешно применяются методы топологической оптимизации [15]. В работе предложено задавать волновой канал, то есть канал, ширина которого периодически изменяется по длине в виде плавной волны, непрерывной огибающей на основе кубического сплайна. Огибающая здесь — плавная кривая, задающая общую форму канала. Кубический сплайн — кусочно-кубическая функция, непрерывная вместе

с первой и второй производными; такой профиль относится к классу C^2 .

Физическое обоснование

Предварительные исследования [14] показали, что сплошные волновые каналы без дискретных полостей обладают диодностью $D \approx 1$. Под сплошным каналом понимается канал с гладкой стенкой без системы отдельных пластин и карманов. Диодность формируется в карманах — полостях между наклонными пластинами. Сплайновая огибающая задаёт общую макроформу этих полостей.

Прямым направлением далее считается течение слева направо, при котором поток проходит канал с меньшим гидравлическим сопротивлением; обратным — течение справа налево. В прямом направлении C^2 -гладкость профиля обеспечивает плавное изменение кривизны и благоприятный градиент давления, что способствует безотрывному обтеканию, то есть течению без отделения пограничного слоя от стенки. Пограничный слой — тонкий слой жидкости у стенки, в котором влияние вязкости существенно.

В обратном направлении поток набегает на тыльную сторону пластин и загоняется в карманы; на краях происходит отрыв пограничного слоя — потеря контакта пристеночного слоя со стенкой с образованием областей обратного течения. Формируются рециркуляционные зоны — области течения с возвратным или замкнутым вихревым движением, а кинетическая энергия потока гасится вязким трением и турбулентной диссипацией — переходом энергии турбулентных пульсаций, то есть случайных колебаний скорости и давления в тепло. Запирание потока в данном исследовании понимается как резкое увеличение гидравлического сопротивления в обратном направлении.

Математическая модель сплайнового профиля

Канал имеет квадратное поперечное сечение 20×20 мм. Геометрия симметрична относительно продольной оси, поэтому профиль описывается функцией полузазора $S(x)$ — расстояния от оси симметрии до стенки. Здесь x — продольная координата вдоль оси канала, мм; для одного периода принято $x = 0$ в начале периода и $x = L_{\text{per}}$ в его конце. Один период длиной L_{per} делится на два участка: диффузорный ($0 \leq x \leq l$, полузазор растёт от r_1 до r_2) и конфузорный ($l \leq x \leq L_{\text{per}}$, полузазор убывает от r_2 до r_1). Здесь $l = \lambda L_{\text{per}}$ — координата точки сшивки диффузорного и конфузорного участков, в которой задано значение полузазора; $S(l) = r_2$;

$\lambda \in (0,1)$ — параметр асимметрии. При этом в силу условий C^2 -сшивки и «зажатых концов» фактический локальный максимум профиля смещён вправо от точки сшивки и превышает r_2 ; для рассчитанных конфигураций $S_{\max} = 6,82$ мм при $x \approx 26,3$ мм для Spline-Sin и $S_{\max} = 9,46$ мм при $x \approx 25,6$ мм для Spline-KD2 при табличных $r_2 = 4,8$ и $7,1$ мм соответственно.

На каждом участке профиль задаётся кубическим полиномом:

$$S_1(x) = a_1 x^3 + b_1 x^2 + c_1 x + d_1, \quad 0 \leq x \leq l, \\ S_2(x) = a_2 (x-l)^3 + b_2 (x-l)^2 + c_2 (x-l) + d_2, \quad l \leq x \leq L_{\text{per}}, \quad (1)$$

где $S_1(x)$ и $S_2(x)$ — полузазоры на первом и втором участках периода; $a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, c_2, d_2$ — коэффициенты кубических полиномов, определяемые из граничных условий и условий сшивки. Штрих далее означает производную по координате x : $S' = dS/dx$, $S'' = d^2S/dx^2$, $S''' = d^3S/dx^3$.

Для определения восьми коэффициентов накладывается система условий, обеспечивающая C^2 -гладкость внутри периода: значения полузазора на концах периода и в точке сшивки ($S_1(0) = r_1$, $S_2(L_{\text{per}}) = r_1$, $S_1(l) = S_2(l) = r_2$); условия «зажатых концов», то есть нулевые первые производные на концах периода $S_1'(0) = 0$, $S_2'(L_{\text{per}}) = 0$; непрерывность первой и второй производных в точке сшивки ($S_1'(l) = S_2'(l)$, $S_1''(l) = S_2''(l)$). Из граничных условий следуют $d_1 = r_1$, $c_1 = 0$. Решение полной системы линейных уравнений позволяет выразить все коэффициенты через три независимых параметра: r_1, r_2 и λ при фиксированном L_{per} . При повторении периодов дополнительно контролируется непрерывность S и S' на границе периодов; непрерывность S'' на этой границе при необходимости обеспечивается отдельным условием периодичности.

Дискретизация огибающей и построение геометрии

Сплайн задаёт только огибающую. Физическая конструкция — набор $N = 20$ наклонных пластин на каждой стенке. Параметры пластин фиксированы: толщина $t = 1$ мм; угол наклона к горизонту $\alpha = 30^\circ$; отступы от торцов $M = 40$ мм; полная длина канала L_{total} . Для рассчитанных конфигураций с тремя периодами $L_{\text{total}} = 3L_{\text{per}} + 2M$. Пластины размещаются равномерно в рабочей зоне с шагом

$$\Delta x_{\text{step}} = \frac{L_{\text{total}} - 2M}{N - 1}. \quad (2)$$

Для i -й пластины, где $i = 1, \dots, N$ — координата точки крепления пластины на стенке принята равной

$$x_{\text{wall}, i} = M + (i - 1)\Delta x_{\text{step}}, \quad (3)$$

через $y_i^{(n)}$ обозначена вертикальная координата вершины пластины относительно оси канала на n -й итерации; через $x_{\text{proj}}^{(n)}$ — горизонтальная координата проекции этой вершины. Здесь $n = 0, 1, 2, \dots$ — номер итерации. Из-за наклона пластины вершина смещена по горизонтали относительно точки крепления.

Для точного позиционирования применяется итерационный алгоритм:

$$y_i^{(0)} = S(x_{\text{wall}, i}), \quad x_{\text{proj}}^{(n)} = x_{\text{wall}, i} + y_i^{(n)} \tan(60^\circ),$$

$$y_i^{(n+1)} = S(x_{\text{proj}}^{(n)}). \quad (4)$$

Критерий останова: $|y_i^{(n+1)} - y_i^{(n)}| < 10^{-6}$ мм. Множитель учитывает, что угол между пластиной и вертикалью равен 60° . Горизонтальная проекция толщины пластины составляет

$$t_{\text{horiz}} = \frac{t}{\cos(60^\circ)} = 2 \text{ мм}. \quad (5)$$

Минимальный вертикальный зазор $S_{\min}$ между верхними и нижними пластинами контролируется по результатам построения геометрии и для технологически реализуемой конструкции должен составлять не менее 3 мм.

Методология численного моделирования

Расчёты выполнены в ANSYS CFX 2023 R2 стационарный решатель. Рабочая среда — вода при 20°C ; $\rho = 998,2 \text{ кг/м}^3$ — плотность; $\mu = 1,003 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ — динамическая вязкость. Математическая модель — стационарные уравнения Навье — Стокса, осреднённые по Рейнольдсу (RANS — Reynolds-Averaged Navier — Stokes), с замыканием $k - \omega$. Здесь k — турбулентная кинетическая энергия; ω — удельная скорость её диссипации.

Выбор модели $k - \omega$ обоснован следующим. Во-первых, она относится к двухпараметрическим моделям, интегрируемым до стенки сквозь вязкий подслой без пристеночных функций и корректно воспроизводит пристеночные и отрывные течения с неблагоприятным градиентом давления при умеренных числах Рейнольдса [11, 16]. Во-вторых, определяющее влияние на гидравлическое сопротивление оказывают не осреднённые параметры основного сечения, а локальные: течение в зазорах между пластинами (характерный размер 2–3 мм, $Re \sim 10^3$) и слои смещения за кромками пластин при обратном течении, где локальные числа Рейнольдса, построенные на перепаде скоростей и толщине слоя смещения, существенно превышают критические значения устойчивости слоя, что приводит к турбулизации даже при умеренном глобальном Re . Расчёты гидродиазов и клапанов Тесла в диапазоне $Re = 10^3 - 10^4$ в литературе выполняются с двухпараметрическими RANS-моделями, включая $k - \omega$ [6, 8, 9, 15]. В-третьих, при низком уровне турбулентности на входе модель не генерирует турбулентность искусственно в невозмущённых областях потока. Теплообмен не учитывается (адиабатический режим, то есть отсутствие теплообмена со стенками).

Граничные условия: на входе и выходе задан постоянный перепад давления $\Delta p = 2$ атм ($P_{\text{вх}} = 202650 \text{ Па}$ избыточного давления, $P_{\text{вых}} = 0 \text{ Па}$ избыточного давления; избыточное давление отсчитывается от атмосферного, $1 \text{ атм} = 101325 \text{ Па}$). Для обратного направления вход и выход менялись местами. На стенках — условие прилипания (no-slip), то есть скорость жидкости на стенке равна нулю. На входе задан низкий уровень турбулентности — интенсивность турбулентности 1 %.

Сетка — структурированная гексаэдрическая, то есть состоящая из упорядоченных шестигранных ячеек; 2,5–3,4 млн узлов в зависимости от конфигурации. Пристеночное разрешение $y^+ \leq 2$, где y^+ — стандартное безразмерное расстояние до стенки, используемое для оценки рас-

решения вязкого подслоя, то есть тонкой области у стенки, где определяющую роль играет молекулярная вязкость. Локальные сгущения выполнены вблизи пластин и в зазорах (размер ячейки не более 0,5 мм). Проверка сеточной сходимости, то есть независимости решения от измельчения сетки, выполнена на трёх сетках: различие массовых расходов между средней и мелкой сетками не превышало 1 %. Критерии сходимости: остаточные невязки уравнений, то есть мера невязки дискретизированных уравнений, менее 10^{-5} ; дисбаланс массы, то есть относительная разница массовых расходов на входе и выходе, менее 0,1 %.

Характерное число Рейнольдса определяется как $Re = \rho UL_c / \mu$, где U — средняя по расходу характерная скорость основного канала; L_c — характерный гидравлический размер; для основного квадратного сечения 20×20 мм принят гидравлический диаметр 20 мм. Для основного канала $Re \sim 10^4 - 10^5$, в зазорах между пластинами при характерном размере зазора $Re \sim 10^3$.

Критерий диодности:

$$D = \frac{|\dot{m}_{\text{прям}}|}{|\dot{m}_{\text{обр}}|} \text{ при } |\Delta p| = \text{const}, \quad (6)$$

где $\dot{m}$ — массовый расход; индексы «прям» и «обр» обозначают прямое и обратное направления течения.

Результаты моделирования и анализ характеристик

Были синтезированы две сплайновые конфигурации: Spline-Sin и Spline-KD2 — условные назва-

ния профилей с разной глубиной модуляции сечения, то есть с разным различием полузазора в точке сшивки r_2 и минимального полузазора r_1 . Названия используются только для различения конфигураций. Геометрические параметры приведены в табл. 1; результаты расчётов — в табл. 2.

Конфигурация Spline-Sin показала диодность $D = 2,54$ при прямом массовом расходе 0,676 кг/с. Картина течения в обоих направлениях представлена на рис. 1. Это выше типичных значений для простых конфузочно-диффузорных элементов, для которых обычно $D < 1,5$ [12], и одноступенчатых клапанов Тесла, работающих в диапазоне $D = 1 - 2$ [10]. Для микроканалов, то есть каналов с характерным размером порядка единиц миллиметров и менее, при низких числах Рейнольдса характерно $D \approx 1,43$ [7]. Порог $D > 2$ для клапанов Тесла достигается либо многоступенчатыми схемами [8], либо нестационарными пульсирующими потоками [6]. Вихревые диоды дают большие значения D , но требуют принципиально иной компоновки с тангенциальным подводом [9]. Таким образом, $D = 2,54$ для линейного стационарного сплайнового канала, то есть прямолинейного канала без подвижных частей, является конкурентоспособным результатом. Сравнение с литературой носит качественный характер, поскольку конструкции различаются масштабом, числами Рейнольдса, перепадом давления и рабочей жидкостью.

Для конфигурации Spline-KD2 с большей амплитудой модуляции ($r_2 = 7,1$ мм против 4,8 мм) диодность составила $D = 1,64$. Прямой расход остался приемлемым (0,524 кг/с), но обратный расход оказался выше ожидаемого (0,320 кг/с). Линии тока для данной конфигурации показаны на рис. 2. Дополни-

Таблица 1. Геометрические параметры сплайновых моделей
Table 1. Geometric parameters of spline models

Параметр	Spline-Sin	Spline-KD2
r_1 (минимальный полузазор), мм	1,7	1,5
r_2 (полузазор в точке сшивки), мм	4,8	7,1
$S_{\max}$ (фактический максимальный полузазор), мм	6,82	9,46
$x(S_{\max})$ (координата фактического максимума), мм	$\approx 26,3$	$\approx 25,6$
l (координата точки сшивки, в которой $S = r_2$), мм	12	14
L_{per} (длина периода), мм	70	66
$\lambda = l / L_{\text{per}}$	0,171	0,212
Число периодов	3	3
L_{total} (полная длина канала), мм	290	278
N (число пластин на каждой стенке)	20	30°
α (угол наклона пластин к горизонту)	30°	
t (толщина пластины), мм	1	1
M (отступ от торцов), мм	40	40
$S_{\min}$ (минимальный вертикальный зазор), мм	$\approx 3,0$	$\approx 1,1$

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Таблица 2. Гидравлические характеристики сплайновых гидродиодов
($\Delta p = 2$ атм)

Конфигурация	$\dot{m}_{\text{прям}}$, кг/с	$\dot{m}_{\text{обр}}$, кг/с	Диодность, D
Spline-Sin	0,676	0,266	2,54
Spline-KD2	0,524	0,320	1,64

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

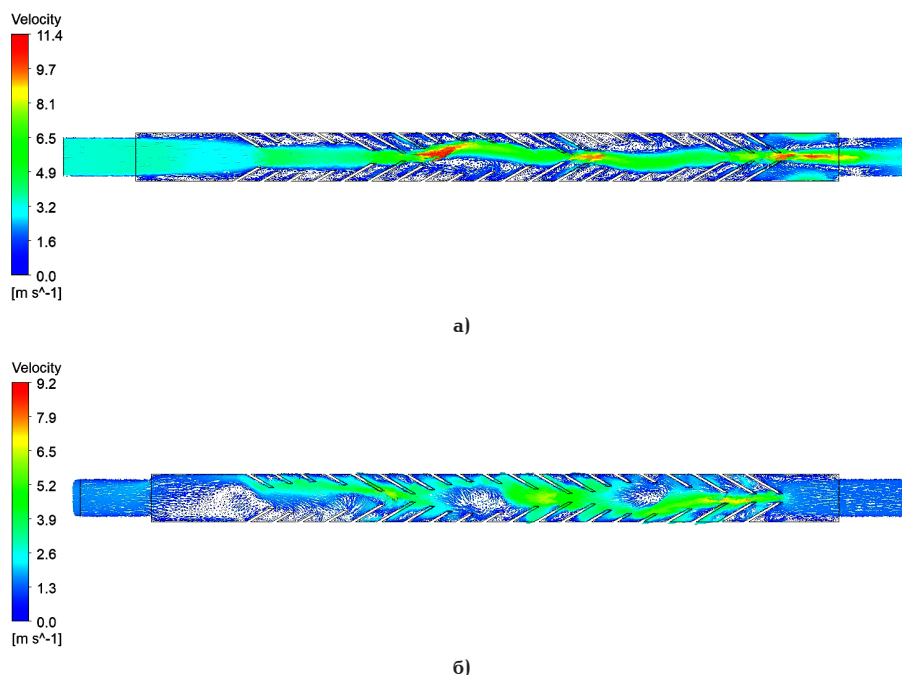


Рис. 1. Линии тока волнового канала с кубическим сплайном Spline-Sin:
а) прямое направление; б) обратное направление
Fig. 1. Current lines of a wave channel with the Spline-Sin cubic spline:
a) forward direction; б) reverse direction

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

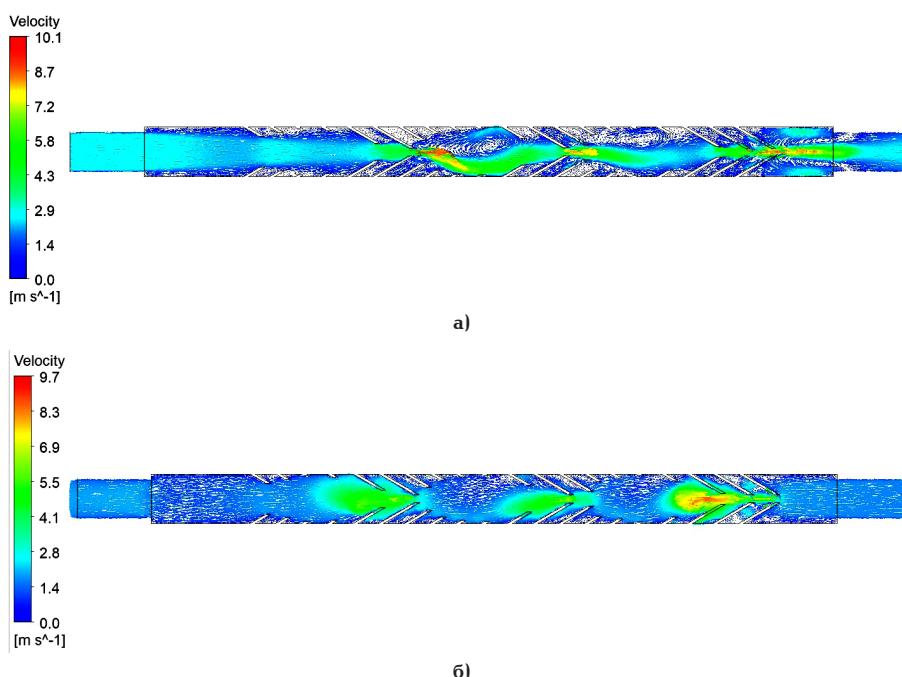


Рис. 2. Линии тока волнового канала с кубическим сплайном Spline-KD2:
а) прямое направление; б) обратное направление
Fig. 2. Current lines of a wave channel with the Spline-KD2 cubic spline:
a) forward direction; б) reverse direction

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

тельный фактор — малый минимальный вертикальный зазор $S_{\min} \approx 1,1$ мм, который повышает общее сопротивление в обоих направлениях и уменьшает относительную разницу между ними; малый зазор является следствием смещения фактического максимума огибающей ($S_{\max} = 9,46$ мм), при котором проходное сечение в наиболее широкой части периода оказывается почти полностью перекрытым выступами пластин. Поэтому конфигурация Spline-

KD2 не удовлетворяет принятому технологическому ограничению $S_{\min} \geq 3$ мм и рассматривается как расчётный случай для анализа предела сглаживания. Наблюдаемое снижение диодности указывает на то, что кубический сплайн сглаживает резкие геометрические элементы, необходимые для сильного запираения потока. Поскольку рассчитаны только две конфигурации, данный вывод носит предварительный характер.

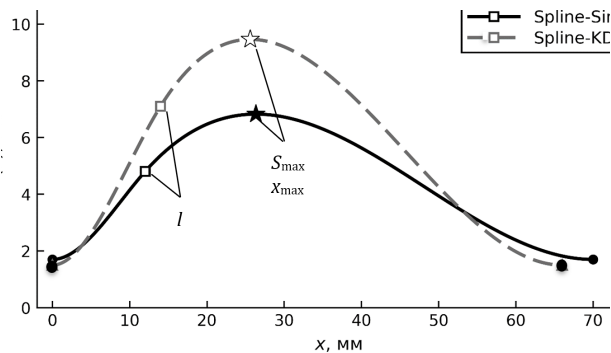


Рис. 3. Профиль полузазора $S(x)$ одного периода для конфигураций Spline-Sin и Spline-KD2: круги (●) — концы периода с минимальным полузазором $S = r_1$ ($x = 0$ и $x = L_{per}$); квадраты (□) — точка сшивки $x = l$ с полузазором $S = r_2$; звездочка (★) — фактический локальный максимум $S_{max} > r_2$ в точке $x_{max} > l$ для Spline-Sin $S_{max} = 6,82$ мм при $x_{max} \approx 26,3$ мм и для Spline-KD2 $S_{max} = 9,46$ мм при $x_{max} \approx 25,6$ мм

Fig. 3. Half-gap profile $S(x)$ of one period for the Spline-Sin and Spline-KD2 configurations: circles (●) — period ends with the minimum half-gap $S = r_1$ ($x = 0$ и $x = L_{per}$); squares (□) — splice point $x = l$ with half-gap $S = r_2$; stars (★) — actual local maximum $S_{max} > r_2$ at $x_{max} > l$; $S_{max} = 6.82$ mm at $x_{max} \approx 26.3$ mm for Spline-Sin and $S_{max} = 9.46$ mm at $x_{max} \approx 25.6$ mm for Spline-KD2

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

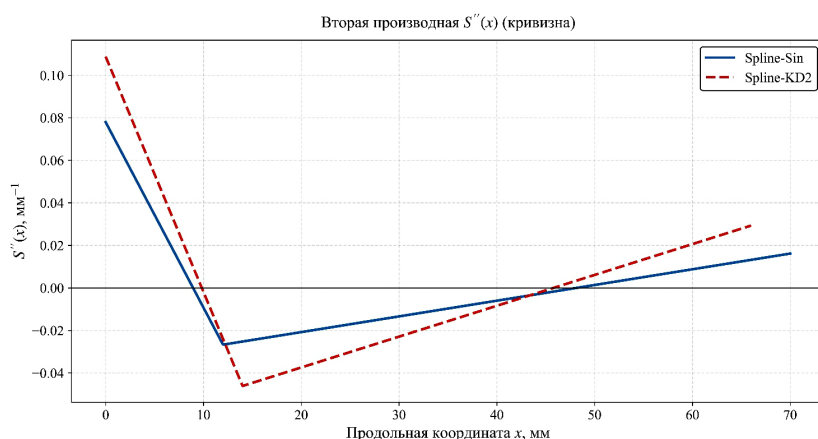


Рис. 4. Вторая производная $S''(x)$ (кривизна профиля) для конфигураций Spline-Sin и Spline-KD2

Fig. 4. Second derivative $S''(x)$ (profile curvature) for Spline-Sin and Spline-KD2 configurations

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

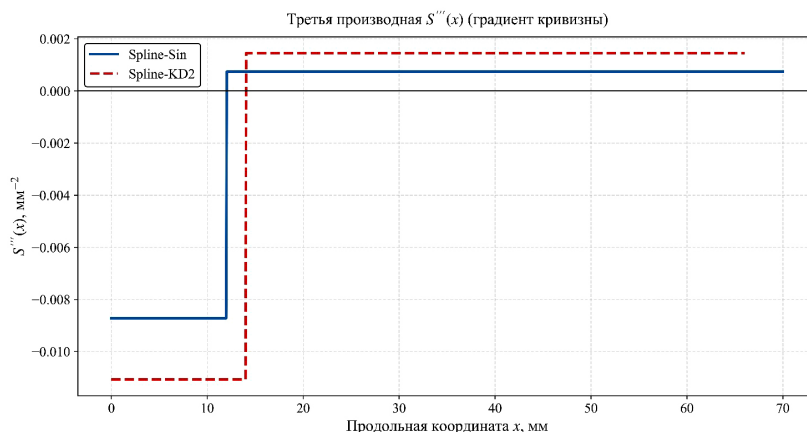


Рис. 5. Третья производная $S'''(x)$ (градиент кривизны) для конфигураций Spline-Sin и Spline-KD2

Fig. 5. Third derivative $S'''(x)$ (curvature gradient) for Spline-Sin and Spline-KD2 configurations

Источник / Source: разработано автором / compiled by the author

Дифференциально-геометрические ограничения кубических сплайнов

Для объяснения различий между конфигурациями используются производные полузазора: $S''(x) = d^2S/dx^2$ — вторая производная, связанная с кривизной профиля; $S'''(x) = d^3S/dx^3$ — третья производная, связанная с градиентом кривизны; $S^{(IV)}(x) = d^4S/dx^4$ — четвёртая производная. Резкие дискретные конструкции опираются на локальные скачки $S''(x)$ и локализованные пики $S'''(x)$, которые формируют геометрические «ступеньки» и обеспечивают жёсткий отрыв пограничного слоя при обратном обтекании.

Кубический сплайн кусочно-полиномиален третьей степени, поэтому его четвёртая производная равна нулю внутри каждого полиномиального участка:

$$S^{(IV)}(x) = 0. \quad (7)$$

Условия C^2 -сшивки означают, что $S''(x)$ непрерывна внутри периода и в точке сшивки, а $S'''(x)$ кусочно-постоянна, то есть принимает по одному постоянному значению на каждом участке периода. Следовательно, сплайн не способен воспроизвести разрывы $S''(x)$ и резкие локальные изменения $S'''(x)$. Он выступает как геометрический сглаживающий фильтр, ограниченный в воспроизведении локальных пиков высших производных.

На рис. 3–5 приведены графики полузазора $S(x)$ и его производных $S''(x)$ и $S'''(x)$ для обеих конфигураций. Профиль $S(x)$ (рис. 3) демонстрирует, что Spline-KD2 имеет более крутые склоны и большую амплитуду модуляции по сравнению с Spline-Sin. Вторая производная $S''(x)$ (рис. 4) непрерывна, однако её поведение различно: у Spline-Sin кривизна меняется плавно, а у Spline-KD2 наблюдаются более резкие изменения, что связано с попыткой описать сплайном агрессивную геометрию. Третья производная $S'''(x)$ (рис. 5) на каждом из двух полиномиальных участков периода остаётся постоянной, испытывая разрыв в точке сшивки $x = 1$. Это прямое следствие кубической сплайн-интерполяции: $S'''(x)$ кусочно-постоянна, а $S^{(IV)}(x) = 0$ внутри участков. Таким образом, сплайн не способен воспроизвести локализованные пики S''' и разрывы S'' , необходимые для эффективного вихревого запираания в резких профилях.

В модели Spline-KD2 попытка описать резкий профиль сплайном привела к сглаживанию склонов карманов и смещению точек отрыва пограничного слоя. В результате обратный поток обтекания выступы без формирования интенсивных дискретных вихрей, турбулентная диссипация снизилась, и диодность уменьшилась до 1,64. Для профилей с плавным изменением кривизны, таких как Spline-Sin, сплайновая модель эффективна. Для резких профилей нужны другие геометрические представления: прямое задание координат пластин или сплайновые модели более высоких порядков.

Заключение

В работе предложена, математически описана и исследована методом вычислительной гидродинамики концепция сплайнового волнового гидродиода.

Задание профиля стенки в виде непрерывного кубического сплайна с зажатými концами позволяет свести число варьируемых геометрических параметров к трём (r_1 , r_2 , λ) при фиксированных конструктивных параметрах ($N = 20$, $\alpha = 30^\circ$, $t = 1$ мм,

$M = 40$ мм). Это открывает путь к построению приближённых или суррогатных моделей, заменяющих полные CFD-расчёты, и к многокритериальной оптимизации.

Для плавного профиля Spline-Sin достигнута диодность $D = 2,54$ при перепаде давления $\Delta p = 2$ атм. Этот показатель сопоставим с диодностью многоступенчатых клапанов Тесла и существенно превосходит значения, характерные для простых диффузорно-конфузорных элементов ($D < 1,5$), при сохранении простой линейной геометрии.

Дифференциально-геометрический анализ, подтверждённый графиками производных (рис. 4, 5), показал, что кубический сплайн является сглаживающим фильтром. Равенство $S^{(IV)} = 0$ внутри полиномиальных участков и кусочная постоянность S''' делают невозможным воспроизведение разрывов кривизны и локализованных пиков градиента кривизны. Поэтому предложенная модель не может заменить дискретную параметризацию для конфигураций, диодный эффект которых опирается на локальную геометрическую «агрессивность», то есть на резкие выступы, ступеньки и малые радиусы скругления (Spline-KD2: $D = 1,64$).

Ограничения работы: результаты получены для двух конфигураций при единственном значении Δp ; экспериментальная верификация отсутствует. Течение в канале формально относится к переходному диапазону чисел Рейнольдса. Корректность осреднённой постановки обоснована выбором низкорейнольдсовой модели $k-\omega$ и низким уровнем турбулентности на входе; для окончательной верификации планируется сопоставление с ламинарным расчётом и нестационарный расчёт (URANS/LES). Для подтверждения выявленных закономерностей необходима серия расчётов с вариацией параметров $r_1 \in [1,5; 5,0]$ мм, $r_2 \in [5,0; 9,0]$ мм, $\lambda \in [0,1; 0,4]$ и построение приближённых зависимостей $D(r_1, r_2, \lambda)$, что является целью дальнейших исследований.

Финансирование / Funding

Исследование выполнено за счёт средств гранта Российского научного фонда № 25-29-20049 и гранта Омской области (соглашение № 7).

The research was funded by the Russian Science Foundation grant No. 25-29-20049 and by the Omsk Region grant (agreement No. 7).

Список источников / References

- Yoder G. L. Jr., Elkassabgi Y. M., De Leon G. I. [et al.]. Vortex diode analysis and testing for fluoride salt-cooled high-temperature reactors. Oak Ridge National Laboratory, 2011.
- Ly Q., Chen M., Sun X. [et al.]. Design of fluidic diode for a high-temperature DRACS test facility. *International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings (ICONE. 4)*. <https://doi.org/10.1115/ICONE21-16902>.
- Shin S., Jeong J. H., Lim D. K. [et al.]. Design of SFR fluidic diode axial port using topology optimization. *Nuclear Engineering and Design*. 2018;338:63–73. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.07.028>.
- Chikazawa Y., Aizawa K., Shiraishi T., Sakata H. Experimental demonstration of flow diodes applicable to a passive decay heat removal system for sodium-cooled reactors. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2009;46(4):321–330. <https://doi.org/10.1080/18811248.2007.9711537>.
- Purwidyantri A., Prabowo B. A. Tesla valve microfluidics: the rise of forgotten technology. *Chemosensors*. 2023;11(4):256. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11040256>.

6. Nguyen Q. M., Abouezzi J., Ristroph L. Early turbulence and pulsatile flows enhance diodicity of Tesla's macrofluidic valve. *Nature Communications*. 2021;12:2884. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23009-y>.
7. Liosis C., Papadatos A., Pagonis D.-N. [et al.]. Diodicity of MicroTesla valves under various re numbers. *Micromachines*. 2025;16(12):1329. <https://doi.org/10.3390/mi16121329>.
8. Wang P., Hu P., Liu L. [et al.]. On the diodicity enhancement of multistage Tesla valves. *Physics of Fluids*. 2023;35(5):052010. <https://doi.org/10.1063/5.0145172>.
9. Kulkarni A. A., Ranade V. V., Rajeev R., Koganti S. B. Pressure drop across vortex diodes: experiments and design guidelines. *Chemical Engineering Science*. 2009;64(6):1285–1292. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.10.060>.
10. Tesla N. Valvular conduit. US patent 1,329,559. 23 Feb. 1920.
11. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994;32(8):1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>.
12. Stemme E., Stemme G. A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump. *Sensors and Actuators A: Physical*. 1993;39(2):159–167. [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(93\)80213-Z](https://doi.org/10.1016/0924-4247(93)80213-Z).
13. Балуев Д. Е., Гусев Д. В., Мешков С. И. [и др.]. Исследование функциональных характеристик обратного клапана системы безопасности на масштабной модели // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2015. Т. 1, № 2. С. 103–110. <https://doi.org/10.26583/npe.2015.1.11>. EDN: VSUXEN.
14. Baluev D. E., Gusev D. V., Meshkov S. I. [et al.]. Study of functional characteristics for safety system check valve using scaled model. *Nuclear Energy and Technology*. 2015;1(2):103–110. <https://doi.org/10.26583/npe.2015.1.11>. EDN: VSUXEN. (In Russ.).
15. Shcherba V. E., Khait A. A., Kaigorodov S. Yu. [et al.]. Multidimensional optimization of the high-diodicity diaphragm hydrodiode for passive safety systems of nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*. 2026;450:114803. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2026.114803>.
16. Lim D. K., Song M. S., Chae H., Kim E. S. Topology optimization on vortex-type passive fluidic diode for advanced nuclear reactors. *Nuclear Engineering and Technology*. 2019;51(5):1279–1288. <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.03.018>.
17. Wilcox D. C. Formulation of the K-omega turbulence model revisited. *AIAA Journal*. 2008;46(11):2823–2838. <https://doi.org/10.2514/1.36541>.

Информация об авторе:

КАЙГОРОДОВ Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Гидромеханика

и транспортные машины» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 4982-0580

AuthorID (РИНЦ): 686382

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4085-1809>

AuthorID (SCOPUS): 686382

e-mail: Sergey7-2005@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи автор не использовал генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 17.08.2026; одобрена после рецензирования 01.09.2026; принята к публикации 18.09.2026.

Information about the author:

KAIGORODOV Sergei Yurevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Hydromechanics and Transport Machines Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 4982-0580

AuthorID (RSCI): 686382

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4085-1809>

AuthorID (SCOPUS): 686382

e-mail: Sergey7-2005@mail.ru

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript. The author did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 17.08.2026; approved after reviewing 01.09.2026; accepted for publication 18.09.2026.