

УДК 629.3.064.3

Разработка и экспериментальное исследование нового высокоэффективного диафрагменного гидродиода*

В.Е. Щерба, С.Ю. Кайгородов, Е.А. Дорофеев,
Е.А. Павлюченко, К.Н. Сокирко

Омский государственный технический университет

Development and Experimental Study of a New High-Efficiency Diaphragm Hydraulic Diode

V.E. Shcherba, S.Y. Kaigorodov, E.A. Dorofeev,
E.A. Pavlyuchenko, K.N. Sokirko

Omsk State Technical University

Разработан и экспериментально исследован высокоэффективный диафрагменный гидродиод с асимметричной конфигурацией пластин, обеспечивающий стабильно высокую диодность в широком диапазоне перепада давления Δp . Методика исследования включала в себя теоретическое обоснование использования асимметрии пластин разной длины, изготовление опытного образца методом 3D-печати и всесторонние испытания на специализированном гидравлическом стенде с водой в качестве рабочей жидкости. Подтверждена высокая эффективность предложенной конструкции. Установлено, что средняя диодность разработанного гидродиода варьируется от 2,026 ($\Delta p = 10$ кПа) до 1,824 (при $\Delta p = 50$ кПа), что на 20...40 % превышает характеристики традиционных симметричных аналогов. Погрешность измерения расхода не превышала 1,5 %, а статистический анализ подтвердил достоверность результатов. Практическая ценность работы заключается в возможности применения разработанного гидродиода в микрофлюидике, медицинской технике, системах охлаждения электроники и других областях, где требуются компактные и эффективные средства пассивного управления потоком.

EDN: QURLDN, <https://elibrary/qurldn>

Ключевые слова: диафрагменный гидродиод, диодность, асимметричная конфигурация пластин, экспериментальное исследование, лабиринтная траектория течения потока, пассивное управление потоком

This work aims to develop and experimentally study a high-efficiency diaphragm hydraulic diode with an asymmetric configuration of plates of different lengths. The research focuses on creating a device with stable high diodicity over a wide range of operating pressure drops. The methodology included theoretical substantiation of the concept, manufacturing a prototype using 3D printing, and comprehensive testing on a specialized hydraulic test bench with water as the working fluid. A key result of this study is the confirmation of the high efficiency of the proposed design. It was found that the average diodicity of the developed hydraulic diode varies from 2.026 (at $\Delta p = 10$ kPa) to 1.824 (at $\Delta p = 50$ kPa). This performance is 20–40 % higher than that of traditional symmetrical analogues. The flow meas-

* Работа выполнена по гранту РФФИ № 25-29-20049 «Разработка концептуальных основ многомерной оптимизации резисторных гидродиодов на основе использования нейронных сетей».

urement error did not exceed 1.5%, and statistical analysis confirmed the reliability of the results. The practical value of the work lies in the potential application of the developed hydraulic diode in microfluidics, medical equipment, electronics cooling systems, and other areas requiring compact and efficient means of passive flow control.

EDN: QURLDN, <https://elibrary/qurldn>

Keywords: diaphragm hydraulic diode, diodicity, asymmetric configuration of plates, experimental research, labyrinthine flow path, passive flow control

Современные тенденции развития микрофлюидики, прецизионной медицинской техники, систем охлаждения электроники и бесклапанных гидравлических систем предъявляют повышенные требования к средствам управления потоком рабочей жидкости (РЖ) [1–4]. Одним из основных элементов таких систем является гидродиод — пассивное устройство, создающее асимметричное гидравлическое сопротивление: минимальное при прямом направлении течения РЖ и максимальное при обратном [5–7]. Эта функциональность, аналогичная полупроводниковому диоду в электронике, важна для решения задач гидравлического запираания, защиты от гидроударов, рекуперации энергии и точного дозирования.

Несмотря на то, что принцип работы гидродиода известен давно, проблема создания компактных, высокоэффективных и надежных современных конструкций остается актуальной, о чем свидетельствуют публикации [8–13]. Среди множества различных гидродиодов (вихревых, сопловых, диафрагменных) наибольший интерес для решения задач, требующих стабильности в широком диапазоне расхода РЖ, представляют диафрагменные гидродиоды резисторного типа. Их работа основана на формировании нелинейных траекторий потока РЖ и контролируемых зон диссипации энергии, что обеспечивает управляемое сопротивление.

В качестве основного параметра, определяющего эффективность гидродиода, выступает диодность D , вычисляемая как отношение объемных расходов РЖ в прямом $Q_{\text{пр}}$ и обратном $Q_{\text{обр}}$ направлениях при одинаковом перепаде давления РЖ [5, 7]:

$$D = Q_{\text{пр}} / Q_{\text{обр}}. \quad (1)$$

Установлено, что диодность D в первую очередь зависит от геометрических параметров устройства. Традиционные подходы к проектированию часто основаны на симметричных конфигурациях пластин, которые обеспечивают

ограниченные значения D , обычно не превышающие 1,3...1,5 в аналогичных условиях [14, 15].

Анализ литературных данных [1–15] показал, что, несмотря на обширные исследования симметричных диафрагменных гидродиодов, систематические работы, посвященные комплексному изучению и оптимизации асимметричных конфигураций с пластинами разной длины, практически отсутствуют.

Цель работы — повышение эффективности диафрагменного гидродиода путем разработки и экспериментального исследования новой конструкции с асимметричным расположением пластин разной длины.

Основная гипотеза заключается в том, что такая конфигурация позволит сформировать лабиринтную траекторию течения РЖ, которая будет минимизировать сопротивление при прямом потоке и максимально его увеличивать при обратном благодаря интенсификации вихреобразования и турбулентной диссипации энергии.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- предложена и исследована конструкция диафрагменного гидродиода с асимметричным расположением пластин разной длины, формирующая лабиринтную траекторию течения потока;
- проведено комплексное экспериментальное исследование такой конструкции, включающее в себя детальную характеристику диодности в диапазоне перепада давления РЖ 10...50 кПа с оценкой погрешностей и статистической достоверности;
- показано количественное превосходство разработанного гидродиода над традиционными симметричными аналогами.

Практическая значимость исследования определяется потенциальным применением усовершенствованного гидродиода в микрофлюидных системах, медицинских насосах и системах охлаждения электроники, где требуются высокоэффективные пассивные элемен-

ты управления потоком РЖ с минимальными габаритными размерами.

Описание предлагаемой конструкции гидродиода. Объектом исследования являлся диафрагменный гидродиод резисторного типа с асимметричным расположением пластин разной длины. Такая конфигурация выбрана для целенаправленного увеличения гидравлического сопротивления при обратном направлении потока по сравнению с традиционными симметричными схемами [14, 15] за счет формирования лабиринтного характера течения.

На основе результатов предварительного анализа, направленного на максимизацию диодности, выбраны следующие геометрические параметры образца гидродиода: эксцентриситет пластин $l = 1,31$ мм; межпластинчатый зазор $s = 6,26$ мм; расстояние между креплениями пластин $\Omega = 41,08$ мм; угол наклона пластин $\beta = 32,17^\circ$.

Количество пар пластин на противоположных стенках гидродиода — 8 шт., размер канала гидродиода — 20×20 мм². Эти геометрические параметры ранее использовались в других исследованиях [14, 15].

Схема устройства, поясняющая принцип формирования потока РЖ, приведена на рис. 1. В прямом направлении поток плавно огибает пластины, следуя относительно прямолинейной траектории с минимальными потерями. При обратном течении поток вынужден совершать сложные маневры в образовавшихся асимметричных полостях, что приводит к столкновению со стенками, интенсивному вихреобразованию и значительной диссипации энергии.

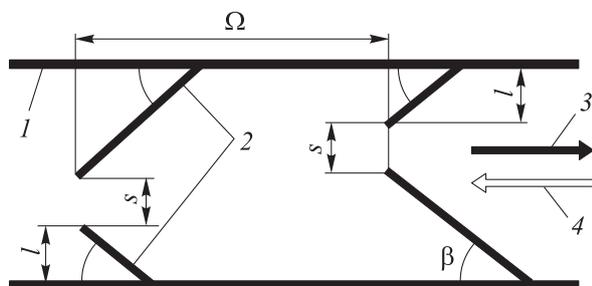


Рис. 1. Схема исследуемого гидродиода:
1 — корпус; 2 — асимметрично расположенные пластины разной длины;
3 и 4 — направление обратного (высокое сопротивление) и прямого (низкое сопротивление) потока

Изготовление опытного образца и оценка механической прочности. Выбор метода и материала изготовления. Опытный образец изготавливали методом аддитивного производства (послойным наращиванием) на 3D-принтере, использующем технологию послойного наплавления (Fused Deposition Modeling). Выбор такой технологии обусловлен ее способностью с высокой точностью воспроизведения сложной внутренней конфигурации устройства, включая асимметричное расположение пластин и лабиринтные каналы, что является ключевым для реализации принципа действия гидродиода.

В качестве материала опытного образца выступал ударопрочный технический пластик АБС (акрилонитрилбутадиенстирол), обладающий оптимальным для поставленной задачи комплексом свойств. Это достаточная механическая прочность (предел прочности при растяжении $\sigma_b = 30 \dots 45$ МПа) [16]; химическая стойкость (инертность к длительному воздействию воды в диапазоне рабочих температур установки); низкое влагопоглощение и умеренный коэффициент теплового расширения, что обеспечивает сохранение точных размеров каналов в условиях эксперимента; возможность применения для 3D-печати сложных деталей с получением гладких поверхностей и точным соблюдением геометрических параметров.

Корпус 1 с системой внутренних пазов и крышку 2 изготавливали отдельно методом 3D-печати, ассиметричные пластины 3 выполняли из оцинкованной стали лазерной резкой (рис. 2). После установки металлических пластин в пазы корпуса крышку приклеивали и прикручивали с помощью болтового соединения для обеспечения герметичности. Такое конструктивное решение позволило исключить необходимость сложной сборки и обеспечить идеальные геометрические характеристики и герметичность. Режимы печати (толщина слоя 0,2 мм; 100%-ное заполнение) подобрали

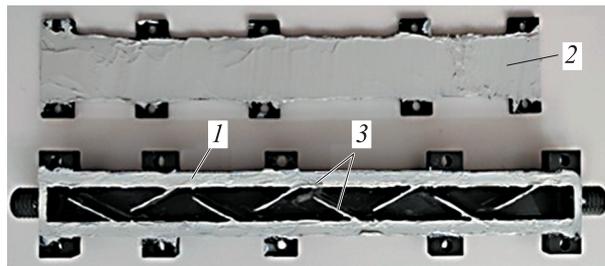


Рис. 2. Внешний вид опытного образца гидродиода

с учетом для достижения максимальной прочности и плотности пластика.

Описание экспериментального стенда. Экспериментальное исследование проводили на специализированном гидравлическом стенде замкнутого типа, схема которого приведена на рис. 3. Конструктивно установка представляла собой жесткую рамную конструкцию, обеспечивающую виброустойчивость и минимальные деформации, что необходимо для получения точных и воспроизводимых результатов.

Основной элемент системы — центробежный насос 10, подающий РЖ из бака 1 через систему трубопроводов к исследуемому гидродиоду 8. После прохождения через гидродиод РЖ возвращается в бак, замыкая циркуляционный контур. Для обеспечения стабильности температурных условий ($20 \pm 0,5$ °С) и исключения влияния изменения вязкости на результаты измерений бак оборудован системой термостатирования.

Расход РЖ регулировали двумя способами: грубым — игольчатым краном 3, и прецизионным — частотным преобразователем 9, управляющим подачей насоса.

Измерительный комплекс включал в себя высокоточные приборы: цифровые манометры QD-1005C/ZT 6, 7 (с верхним пределом измерения (ВПИ) 1600 кПа и приведенной погрешностью ± 1 % ВПИ); прецизионный температурный датчик TW-N (Pt100) 5 (с абсолютной погрешностью $\pm 0,01$ °С); цифровой водяной расходомер OOTDTY 5-го класса точности С (с погрешностью $\pm 0,5$ %).

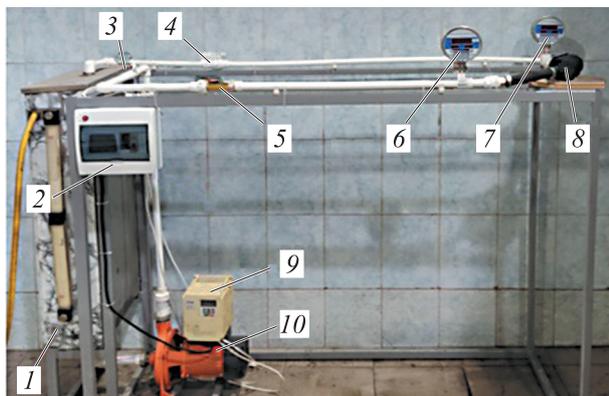


Рис. 3. Схема экспериментального стенда:

1 — бак с РЖ; 2 — блок управления;
3, 4 — игольчатые краны; 5 — расходомер OOTDTY с прецизионным температурным датчиком TW-N (Pt100);
6, 7 — цифровые манометры QD-1005C/ZT;
8 — исследуемый гидродиод; 9 — частотный преобразователь; 10 — центробежный насос

Все приборы прошли предварительную поверку. Суммарная погрешность установки, вычисленная с учетом всех составляющих, не превышала 1,5 %.

План эксперимента и методика измерений. Для определения расходно-перепадных характеристик гидродиода составлен детальный план эксперимента. В качестве независимой переменной (фактора) выбран перепад давления Δp на гидродиоде. Зависимой переменной (откликом) являлся объемный расход РЖ Q через гидродиод.

Перепад давления изменяли ступенчато в диапазоне $p = 10 \dots 50$ кПа с шагом 10 кПа. На каждой ступени после стабилизации потока фиксировали значения давления РЖ на входе и выходе образца, а также объемный расход РЖ. Измерения проводили отдельно для прямого и обратного направлений потока. На выходе гидродиода во всех случаях поддерживалось атмосферное давление.

Для каждого режима выполняли не менее пяти независимых измерений расхода и давления РЖ. Перед фиксацией данных выдерживали паузу для стабилизации стационарного режима течения потока. Полученные значения усредняли. Для каждого усредненного значения объемного расхода РЖ рассчитывали доверительный интервал при уровне доверительной вероятности $P = 0,95$.

Диодность D вычисляли по выражению (1).

Погрешность определения диодности ΔD рассчитывали по стандартной формуле для погрешности косвенных измерений (отношения двух величин) на основе доверительных интервалов для объемных расходов РЖ в прямом $Q_{пр}$ и обратном $Q_{обр}$ направлениях.

Результаты экспериментального исследования. Усредненные экспериментальные значения объемных расходов РЖ в прямом $\bar{Q}_{пр}$ и обратном $\bar{Q}_{обр}$ направлениях и расчетные значения диодности при различных перепадах давления РЖ приведены в табл. 1.

Зависимость диодности D от перепада давления Δp , построенная по данным табл. 1, приведена на рис. 4.

Аппроксимация экспериментальных данных позволила получить уравнение регрессии, описывающее зависимость диодности от перепада давления следующим образом:

$$D(\Delta p) = -0,00001\Delta p^3 + 0,0011\Delta p^2 - 0,0413\Delta p + 2,3373.$$

Таблица 1

Усредненные экспериментальные значения объемных расходов РЖ и расчетные значения диодности при различных перепадах давления РЖ

Δp , кПа	$\bar{Q}_{пр}$, л/мин	$\bar{Q}_{обр}$, л/мин	D
10	11,988	5,919	2,025
20	15,898	8,463	1,879
40	21,633	11,765	1,839
50	25,104	13,761	1,824

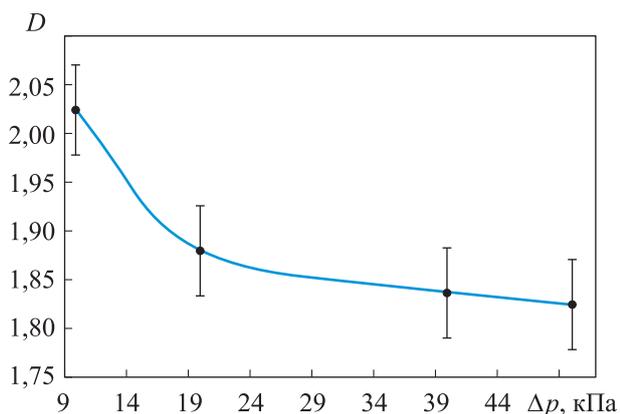


Рис. 4. Зависимость диодности D от перепада давления РЖ Δp :

точки — экспериментальные данные с доверительными интервалами, кривая — результат их аппроксимации

Согласно приведенным данным, диодность разработанного гидродиода превышает 1,82 во всем исследованном диапазоне давления РЖ, демонстрируя устойчивую работу. Наблюдается монотонное снижение диодности при росте перепада давления с 2,026 (при $\Delta p = 10$ кПа) до 1,824 (при $\Delta p = 50$ кПа).

Оценка погрешностей и достоверности результатов. Для обеспечения статистической достоверности экспериментальных данных проведен комплексный анализ погрешностей измерений в соответствии с рекомендациями [17–20]. Оценка включала в себя расчет погрешностей прямых измерений (перепада давления и объемного расхода РЖ) и последующий расчет погрешности косвенно определяемой диодности. Все вычисления выполнены для доверительной вероятности $P = 0,95$, что соответствует уровню значимости $\alpha = 0,05$.

Методика измерений и обработки данных. Для каждого из четырех заданных перепадов давления РЖ Δp (10; 20; 40 и 50 кПа) проведены

пять независимых измерений объемного расхода РЖ как при прямом направлении потока, так и при обратном. Параллельно фиксировали фактические значения перепада давления РЖ на образце.

Таким образом, для каждого режима испытаний получены выборки по пяти значениям объемного расхода и перепада давления РЖ. Статистическая обработка данных включала в себя расчет среднего арифметического значения и стандартного отклонения для каждой выборки. Средние значения объемных расходов в прямом $\bar{Q}_{пр}$ и обратном $\bar{Q}_{обр}$ направлениях при каждом перепаде давления использовали для расчета диодности по формуле (1). Итоговые средние значения объемных расходов РЖ и расчетная диодность приведены на рис. 4.

Расчет погрешностей прямых измерений. Так как объем выборок невелик ($N = 5$), для оценки доверительных интервалов использовано распределение Стьюдента. Число степеней свободы $k = N - 1 = 4$. Для доверительной вероятности $P = 0,95$ коэффициент Стьюдента $t_{0,95;4} = 2,776$.

Погрешность измерения объемного расхода ΔQ . Полная погрешность измерения расхода РЖ формируется двумя независимыми составляющими: инструментальной погрешностью средства измерения и случайной погрешностью, обусловленной разбросом данных в серии измерений.

Согласно паспортным данным, абсолютная инструментальная погрешность цифрового расходомера составляет $\pm 0,5\%$ измеряемого значения. Таким образом, для среднего значения объемного расхода РЖ в серии Q инструментальная составляющая

$$\Theta_Q = 0,005\bar{Q}.$$

Для суммирования со случайной погрешностью, имеющей нормальное распределение, инструментальную погрешность, распределенную равномерно, приводили к стандартной неопределенности делением на коэффициент $k=2$, т. е. $\Theta_{Q ст} = \Theta_Q/2$.

Случайная составляющая обусловлена статистическим разбросом результатов и характеризуется стандартной ошибкой среднего значения $S_{\bar{Q}} = S_Q/\sqrt{N}$, где S_Q — стандартное отклонение серии измерений расхода. Доверительный интервал для случайной составляющей $\Delta Q_{сл} = t_{0,95;4}S_{\bar{Q}}$.

Так как составляющие независимы, полную абсолютную погрешность измерения расхода вычисляли по формуле

$$\Delta Q = t_{0,95;4} \sqrt{\left(\frac{\Theta_Q}{2}\right)^2 + \left(\frac{S_Q}{\sqrt{N}}\right)^2} = \sqrt{(\Theta_{Q_{ст}})^2 + (\Delta Q_{сл})^2}.$$

Относительную погрешность измерения расхода определяли как

$$\delta Q = \Delta Q / \bar{Q}.$$

Погрешность измерения перепада давления РЖ $\Delta(\Delta p)$. Методика расчета аналогична таковой для погрешности расхода РЖ.

Инструментальная составляющая зависит от цифровых манометров, которые имеют приведенную погрешность $\pm 1\%$ верхнего предела измерения (ВПИ = 1600 кПа). Следовательно, абсолютная инструментальная погрешность является постоянной

$$\Theta_{\Delta p} = 0,01 \cdot 1600 \text{ кПа} = 16 \text{ кПа}.$$

Стандартная неопределенность $\Theta_{\Delta p_{ст}} = \Theta_{\Delta p} / 2$. Случайную составляющую рассчитывали на основе стандартного отклонения $S_{\Delta p}$ серии измерений перепада давления РЖ

$$\Delta(\Delta p)_{сл} = t_{0,95;4} \frac{S_{\Delta p}}{\sqrt{N}}.$$

Полную абсолютную погрешность измерения перепада давления РЖ определяли по формуле

$$\Delta(\Delta p) = t_{0,95;4} \sqrt{\left(\frac{\Theta_{\Delta p}}{2}\right)^2 + \left(\frac{S_{\Delta p}}{\sqrt{N}}\right)^2}.$$

Относительная погрешность измерения перепада давления РЖ

$$\delta(\Delta p) = \frac{\Delta(\Delta p)}{\Delta p}.$$

Особенность такой оценки заключается в том, что из-за постоянного значения $\Theta_{\Delta p}$ относительная погрешность измерения малых перепадов давления РЖ оказывается высокой, но с ростом Δp она существенно снижается.

Расчет погрешности косвенного измерения диодности ΔD . Диодность является косвенно измеряемой величиной, так как рассчитывается как отношение двух непосредственно измеряемых параметров:

$$D = \bar{Q}_{пр} / \bar{Q}_{обр}.$$

Диодность — функция двух аргументов, поэтому ее погрешность определяется их погрешностями. В соответствии с правилами распространения погрешностей для мультипликативной функции относительная погрешность диодности

$$\delta D = \sqrt{(\delta Q_{пр})^2 + (\delta Q_{обр})^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta Q_{пр}}{\bar{Q}_{пр}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Q_{обр}}{\bar{Q}_{обр}}\right)^2}.$$

Абсолютная погрешность определения диодности

$$\Delta D = D \delta D.$$

Доверительный интервал для среднего значения диодности определяется нижней D_n и верхней D_b границами:

$$D_n = D - \Delta D; \quad D_b = D + \Delta D.$$

Статистический анализ и итоговые результаты. Результаты расчета границ доверительного интервала, представляющие собой итоговые значения диодности с учетом полной погрешности измерения, приведены в табл. 2.

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы о достоверности результатов:

- высокая точность определения диодности; максимальная относительная погрешность δD не превысила 2,8 % (максимальное значение $\delta D \approx 0,028$ при $\Delta p = 50$ кПа), что свидетельствует о высокой точности косвенного измерения основного параметра;
- стабильность эксперимента; ширина доверительных интервалов для D незначительна, что визуально подтверждают малые вертикальные отрезки на рис. 3; это указывает на высокую воспроизводимость результатов и малый случайный разброс данных;
- влияние погрешности давления на точность определения параметров; высокая отно-

Таблица 2

Расчетные значения границ доверительного интервала

Δp , кПа	D	D_n	D_b
10	2,025	0,043	1,983
20	1,879	0,051	1,828
40	1,839	0,051	1,787
50	1,824	0,051	1,773

сительная погрешность измерения малых перепадов давления (например, $\delta(\Delta p) \approx 16,5\%$ для $\Delta p = 10$ кПа) не оказала существенного влияния на точность определения диодности; основной параметр D зависит только от погрешностей $Q_{пр}$ и $Q_{обр}$; погрешность же измерения Δp влияет на точность позиционирования точки на графике зависимости $D(\Delta p)$, но не на расчет значения D в каждой конкретной точке;

• однородность данных; проверка однородности дисперсий различных серий измерений по F -критерию Фишера показала, что его расчетное значение меньше табличного ($F_{расч} < F_{табл}$) при $\alpha = 0,05$; это означает, что разброс данных во всех сериях измерений является однородным, а условия проведения эксперимента — стабильными.

Таким образом, проведенный комплексный анализ погрешностей подтверждает высокую надежность и достоверность полученных экспериментальных данных. Заявленные значения диодности и выявленная зависимость от перепада давления РЖ статистически значимы.

Выводы

1. Экспериментально подтверждена высокая эффективность разработанной конструкции диафрагменного гидродиода с асимметричным расположением пластин разной длины. Установлено, что в диапазоне перепада давления РЖ 10...50 кПа среднее значение диодности снижается от 2,026 до 1,824, оставаясь стабильно высоким (превышает 1,82) во всем исследованном интервале.

2. С увеличением перепада давления РЖ на гидродиоде увеличивается скорость течения

РЖ в нем. Увеличение скорости течения РЖ приводит к интенсификации турбулизации потока в пространстве между наклонными пластинами. Потери напора (коэффициенты местных сопротивлений) при движении РЖ в прямом и обратном направлениях сближаются, что приводит к уменьшению диодности. Такая тенденция характерна не только для исследованного гидродиода, но и для всех мембранных диодов, в том числе с асимметрией прохода РЖ [14].

3. Проведенный статистический анализ и оценка погрешностей подтвердили достоверность результатов. Погрешность определения диодности не превышала 2,8 %, а расчет доверительных интервалов для доверительной вероятности $P = 0,95$ показал их малую ширину, что свидетельствует о высокой воспроизводимости и надежности экспериментальных данных.

4. Показано существенное преимущество предложенной асимметричной конструкции гидродиода над традиционными симметричными аналогами. Превышение по диодности составило 20...40 % в исследованном диапазоне давления РЖ по сравнению с известными симметричными гидродиодами, у которых этот параметр обычно не превышает 1,3...1,5.

5. Подтверждена работоспособность концепции использования асимметрии пластин разной длины для формирования лабиринтной траектории течения потока. Эта концепция успешно обеспечивает кардинально разную структуру потока и уровень гидравлического сопротивления для прямого и обратного направлений, что и обуславливает рекордные значения диодности.

Литература

- [1] Сокирко К.Н., Павлюченко Е.А., Лысенко Е.А. Повышение эффективности автомобильного транспорта за счет использования гидродиодов в гидравлических системах с учетом кавитационных явлений. *Вестник СибАДИ*, 2024, т. 21, № 4, с. 562–579, doi: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-562-579>
- [2] Jun H., Lei Zoua, Lib Z. et al. Development and performance comparison of valveless piezoelectric pumps with asymmetrical channels. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2020, vol. 314, art. 112241, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112241>
- [3] Yang Z., Dong L., Wang M. et al. Controllable synthesis of silver nanoparticles using a multi-stage microfluidic reactor driven by two valveless piezoelectric pumps. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2022, vol. 346, art. 113871, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113871>
- [4] Mohammadzadeh K., Kolahdouz E.M., Shirani E. et al. Numerical study on the performance of Tesla type microvalve in a valveless micropump in the range of low frequencies. *J. Micro-Bio Robot.*, 2013, vol. 8, no. 3–4, pp. 145–159, doi: <https://doi.org/10.1007/s12213-013-0069-1>

- [5] Лебедев И.В., Трескунов С.Л., Яковенко В.С. *Элементы струйной автоматики*. Москва, Машиностроение, 1973. 359 с.
- [6] Chung C.K. Plasma etching. In: *Encyclopedia of microfluidics and nanofluidics*. Springer, 2014, pp. 1–18, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-27758-0_1251-5
- [7] Letham D.L. *Fluidic system design*. In: Mashing design. Penton, 1966, pp. 210–218.
- [8] Pavlyuchenko E.A., Grigoriev A.V., Kaigorodov S.Y. et al. Aspects of the numerical simulation of high-diode vortex hydrodiodes. *Chem. Petrol. Eng.*, 2023, vol. 59, no. 3–4, pp. 340–346, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-023-01247-9>
- [9] Pandare A., Ranade V.V. Flow in vortex diodes. *Chem. Eng. Res. Des.*, 2015, vol. 102, pp. 274–285, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.05.028>
- [10] Sarvothaman V.P., Kulkarni S.R., Subburaj J. et al. Evaluating performance of vortex-diode based hydrodynamic cavitation device scale and pressure drop using coumarin dosimetry. *Chem. Eng. J.*, 2024, vol. 481, art. 148593, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148593>
- [11] Nguyen Q.M. Emergent flows, irreversibility and unsteady effects in asymmetric and looped geometries. *arXiv:2104.00278*, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.00278>
- [12] Nguyen Q.M., Huang D., Zauderer E. et al. Tesla's fluidic diode and the electronic-hydraulic analogy. *arXiv:2103.14813*, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.14813>
- [13] Khabarova D.F., Podzerko A.V., Spiridonov E.K. Experimental investigation of fluidic diodes. *Procedia Eng.*, 2017, vol. 206, pp. 93–98, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.443>
- [14] Shcherba V.E., Kaigorodov S.Y., Dorofeev E. et al. Development and research of diaphragm hydrolic diode for positive displacement pumps. *Mech. Based Des. Struct. Mach.*, 2025, vol. 53, no. 1, pp. 702–721, doi: <https://doi.org/10.1080/15397734.2024.2374452>
- [15] Kaigorodov S.Y. Influence of the design parameters of a hydraulic diode on its performance. *Russ. Engin. Res.*, 2019, vol. 39, no. 3, pp. 220–221, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19030122>
- [16] Леонович И.А., Адинцов Д.Д. Исследование свойств ABS-пластика в образцах, полученных по технологии FFF-печати. *Вестник Белорусско-Российского университета*, 2023, № 1, с. 13–21, doi: https://doi.org/10.53078/20778481_2023_1_13
- [17] Gryazin D., Belova O. The method for estimating the dynamic error of sensors and modules under their operating conditions and its application. *RusAutoCon*, 2022, pp. 777–781, doi: <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896370>
- [18] Berezina S., Zinin P.V., Schneider D. et al. Combining Brillouin spectroscopy and laser-SAW technique for elastic property characterization of thick DLC films. *Ultrasonics*, 2004, vol. 43, no. 2, pp. 87–93, <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.03.006>
- [19] Житников В.П., Заико Н.А. Комплексный подход к оценке погрешностей в задаче численного анализа данных натурального эксперимента. *Вестник УГАТУ*, 2009, № 2, с. 233–239.
- [20] Мухачев В.А. *Оценка погрешностей измерений*. Томск, ТУСУР, 2012. 24 с.

References

- [1] Sokirko K.N., Pavlyuchenko E.A., Lysenko E.A. Improving efficiency of road transport through the use of hydrodiodes in hydraulic systems taking into account cavitation phenomena. *Vestnik SibADI [The Russian Automobile and Highway Industry Journal]*, 2024, vol. 21, no. 4, pp. 562–579, doi: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-562-579> (in Russ.).
- [2] Jun H., Lei Zoua, Lib Z. et al. Development and performance comparison of valveless piezoelectric pumps with asymmetrical channels. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2020, vol. 314, art. 112241, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112241>
- [3] Yang Z., Dong L., Wang M. et al. Controllable synthesis of silver nanoparticles using a multi-stage microfluidic reactor driven by two valveless piezoelectric pumps. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2022, vol. 346, art. 113871, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113871>
- [4] Mohammadzadeh K., Kolahdouz E.M., Shirani E. et al. Numerical study on the performance of Tesla type microvalve in a valveless micropump in the range of low frequencies. *J. Micro-Bio Robot.*, 2013, vol. 8, no. 3–4, pp. 145–159, doi: <https://doi.org/10.1007/s12213-013-0069-1>

- [5] Lebedev I.V., Treskunov S.L., Yakovenko V.S. *Elementy struynoy avtomatiki* [Elements of fluid automation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 359 p. (In Russ.).
- [6] Chung C.K. Plasma etching. In: *Encyclopedia of microfluidics and nanofluidics*. Springer, 2014, pp. 1–18, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-27758-0_1251-5
- [7] Letham D.L. *Fluidic system design*. In: Mashing design. Penton, 1966, pp. 210–218.
- [8] Pavlyuchenko E.A., Grigoriev A.V., Kaigorodov S.Y. et al. Aspects of the numerical simulation of high-diode vortex hydrodiodes. *Chem. Petrol. Eng.*, 2023, vol. 59, no. 3–4, pp. 340–346, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-023-01247-9>
- [9] Pandare A., Ranade V.V. Flow in vortex diodes. *Chem. Eng. Res. Des.*, 2015, vol. 102, pp. 274–285, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.05.028>
- [10] Sarvothaman V.P., Kulkarni S.R., Subburaj J. et al. Evaluating performance of vortex-diode based hydrodynamic cavitation device scale and pressure drop using coumarin dosimetry. *Chem. Eng. J.*, 2024, vol. 481, art. 148593, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.148593>
- [11] Nguyen Q.M. Emergent flows, irreversibility and unsteady effects in asymmetric and looped geometries. *arXiv:2104.00278*, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.00278>
- [12] Nguyen Q.M., Huang D., Zauderer E. et al. Tesla's fluidic diode and the electronic-hydraulic analogy. *arXiv:2103.14813*, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.14813>
- [13] Khabarova D.F., Podzerko A.V., Spiridonov E.K. Experimental investigation of fluidic diodes. *Procedia Eng.*, 2017, vol. 206, pp. 93–98, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.443>
- [14] Shcherba V.E., Kaigorodov S.Y., Dorofeev E. et al. Development and research of diaphragm hydrolic diode for positive displacement pumps. *Mech. Based Des. Struct. Mach.*, 2025, vol. 53, no. 1, pp. 702–721, doi: <https://doi.org/10.1080/15397734.2024.2374452>
- [15] Kaigorodov S.Y. Influence of the design parameters of a hydraulic diode on its performance. *Russ. Engin. Res.*, 2019, vol. 39, no. 3, pp. 220–221, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19030122>
- [16] Leonovich I.A., Adintsov D.D. Study of properties of ABS plastic in samples obtained by FFF printing technology. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*, 2023, no. 1, pp. 13–21, doi: https://doi.org/10.53078/20778481_2023_1_13 (in Russ.).
- [17] Gryazin D., Belova O. The method for estimating the dynamic error of sensors and modules under their operating conditions and its application. *RusAutoCon*, 2022, pp. 777–781, doi: <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896370>
- [18] Berezina S., Zinin P.V., Schneider D. et al. Combining Brillouin spectroscopy and laser-SAW technique for elastic property characterization of thick DLC films. *Ultrasonics*, 2004, vol. 43, no. 2, pp. 87–93, <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2004.03.006>
- [19] Zhitnikov V.P., Zaiko N.A. The complex approach to the estimation of errors in the problem of the numerical analysis the data of natural experiment. *Vestnik UGATU*, 2009, no. 2, pp. 233–239. (In Russ.).
- [20] Mukhachev V.A. *Otsenka pogreshnostey izmereniy* [Estimation of measurement errors]. Tomsk, TUSUR Publ., 2012. 24 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 02.10.2025

Информация об авторах

ЩЕРБА Виктор Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидромеханика и транспортные машины». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: scherba_v_e@list.ru).

КАЙГОРОДОВ Сергей Юрьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: sergey7-2005@mail.ru).

Information about the authors

SHCHERBA Viktor Evgenievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Hydromechanics and Transport Vehicles Department. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11, e-mail: Scherba_V_E@list.ru).

KAYGORODOV Sergey Yuryevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Hydromechanics and Transport Machines. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11, e-mail: sergey7-2005@mail.ru).

ДОРОФЕЕВ Егор Алексеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: shevdm@mail.ru).

DOROFEEV Egor Alekseevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Hydromechanics and Transport Machines. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11, e-mail: shevdm@mail.ru).

ПАВЛЮЧЕНКО Евгений Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: hystonru@mail.ru).

PAVLYUCHENKO Evgeny Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Hydromechanics and Transport Machines. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11, e-mail: hystonru@mail.ru).

СОКИРКО Ксения Николаевна — старший преподаватель кафедры «Гидромеханика и транспортные машины». Омский государственный технический университет (644050, Омск, Российская Федерация, пр. Мира, д. 11, e-mail: gaika-94@inbox.ru).

SOKIRKO Ksenia Nikolaevna — Senior Lecturer, Department of Hydromechanics and Transport Machines. Omsk State Technical University (644050, Omsk, Russian Federation, Mir Ave., Bldg. 11, e-mail: gaika-94@inbox.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Щерба В.Е., Кайгородов С.Ю., Дорофеев Е.А., Павлюченко Е.А., Сокирко К.Н. Разработка и экспериментальное исследование нового высокоэффективного диафрагменного гидродиода. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 1, с. 77–86.

Please cite this article in English as:

Shcherba V.E., Kaigorodov S.Y., Dorofeev E.A., Pavlyuchenko E.A., Sokirko K.N. Development and Experimental Study of a New High-Efficiency Diaphragm Hydraulic Diode. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 1, pp. 77–86.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию**

«Высокочастотные гравитационные волны»

**Авторы: И.В. Фомин, А.Н. Морозов, И.С. Голяк,
С.В. Червон, А.Л. Назолин**

Представлен обзор возможных космологических и астрофизических источников высокочастотных гравитационных волн. Проанализированы связанные состояния гравитационного и электромагнитного полей в рамках задачи генерирования и детектирования гравитационных волн. Рассмотрены перспективные методы детектирования высокочастотных гравитационных волн.

Для физиков, интересующихся проблемами теории гравитации, космологии, занимающихся гравитационно-волновыми исследованиями, а также для студентов старших курсов, магистров и аспирантов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>