

УДК 621.22-54, 621.6

Гидродиодное регулирование подачи жидкости в прямозубом роторном насосе*

Е.А. Павлюченко¹, С.Ю. Кайгородов¹, А.С. Павлюченко²

¹ Омский государственный технический университет

² Омский автобронетанковый инженерный институт (филиал) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева

Hydrodiode control of liquid supply in a straight-tooth rotary pump

E.A. Pavlyuchenko¹, S.Y. Kaigorodov¹, A.S. Pavlyuchenko²

¹ Omsk State Technical University

² Omsk Armored Engineering Institute (branch) The Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev in Omsk

Прямозубые роторные насосы являются современным и эффективным техническим решением для широкого спектра гидравлических систем. Эти устройства выгодно сочетают в себе простоту конструктивного исполнения с высокими эксплуатационными характеристиками, что позволяет их использовать в различных отраслях промышленности. Предложено новое техническое решение, направленное на регулирование подачи прямозубого роторного насоса с применением в качестве распределительных органов — вихревых гидродиодов. Разработанная конструктивная схема вихревого гидродиода позволяет регулировать как диодность, так и расходные характеристики насоса. Выполнен комплексный расчет течения рабочей жидкости в проточной части регулируемого вихревого гидродиода при различных режимах регулирования. Получена зависимость диодности по расходу от высоты вихревой камеры. Проведен анализ гидродинамических процессов при изменении высоты вихревой камеры в двух крайних положениях. Основным достоинством предложенной конструкции является возможность плавной настройки потока рабочей жидкости. Область плавного регулирования достигает 20 % максимального расхода рабочей жидкости, что расширяет диапазон практического применения устройства в различных гидравлических системах.

EDN: KHMAIL, <https://elibrary/khmail>

Ключевые слова: гидродиодное регулирование, регулируемый вихревой гидродиод, диодность, прямозубый роторный насос

Straight-tooth rotary pumps are a modern and efficient solution for a wide range of hydraulic systems. These devices advantageously combine simplicity of design with high performance characteristics, which allows them to be used in various industries. The article describes a new technical solution aimed at regulating the supply of a straight-tooth rotary pump using vortex hydrodiodes as distribution organs. The developed design scheme of the vortex hydrodiode allows you to adjust both the diode and the flow characteristics of the pump. As part of the study, a comprehensive calculation of the working fluid flow in the flow part of an adjustable vortex hydrodiode was performed under various control modes. The dependence of the diode flow rate on the height of the vortex chamber was obtained.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-20146 и гранта Омской области, <https://rscf.ru/project/25-29-20146/>.

The hydrodynamic processes are analyzed when the height of the vortex chamber changes in two extreme positions. The key advantage of the proposed design is the ability to smoothly adjust the flow of the working fluid. The stepless control area reaches 20% of the maximum fluid flow, which expands the range of practical applications of the device in various hydraulic systems.

EDN: KHMAIL, <https://elibrary/khmail>

Keywords: hydrodiode regulation, adjustable vortex hydraulic diode, diode, straight-tooth rotary pump

Гидравлические системы (гидросистемы) получили широкое распространение в большей части современной техники. В авиационной и космической индустрии, а также в машиностроении гражданского и военного назначения задействовано много механизмов и систем, функционирующих на основе энергии рабочей жидкости (РЖ) под давлением. Гидравлическая энергия обеспечивает этим системам значительные преимущества перед другими технологическими и конструктивными решениями.

Гидравлические приводы (гидроприводы) стали основным инструментом механизации и автоматизации техники [1, 2]. Они эффективно решают задачи управления различными объектами и технологическими процессами, что делает их незаменимыми в различных сферах деятельности. Таким образом, развитие гидравлических технологий напрямую влияет на прогресс основных отраслей современной промышленности, определяя их эффективность и возможности.

Главным источником гидравлической энергии гидропривода являются насосы. По харак-

теру движения рабочего элемента все насосы подразделяют на три основные группы: возвратно-поступательные, роторно-поступательные и роторно-вращательные [3, 4]

Основной особенностью роторно-вращательного насоса является исключительно вращательное движение рабочих элементов [5], что позволяет полностью нивелировать негативное влияние инерционных сил запорных элементов распределительных устройств на его работу. Одной из перспективных конструкций роторно-вращательных машин является прямозубый роторный насос [6, 7], схема которого приведена на рис. 1.

Принцип действия прямозубого роторного насоса основан на циклическом изменении объема рабочих камер при вращении ротора. При вращении ведущего вала 3 начинает вращаться ротор 8, причем зуб 7 делит рабочую камеру 2 на две части. Через окно всасывания 9 вслед за зубом происходит поступление РЖ под низким давлением, а перед зубом — сжатие и нагнетание РЖ потребителю. Периодически зуб входит во впадину 6 уплотнительного диска 5 и

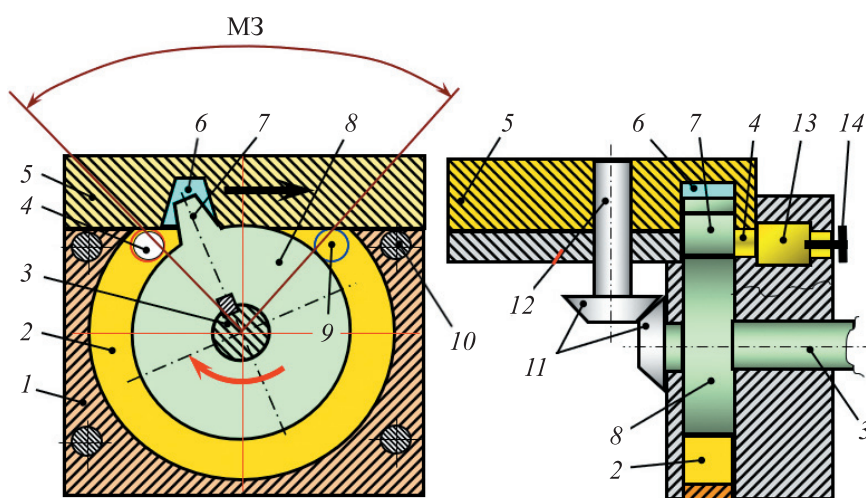


Рис. 1. Конструктивная схема прямозубого роторного насоса:

- 1 — корпус; 2 — рабочая камера; 3 — ведущий вал; 4 и 9 — окна нагнетания и всасывания;
5 — уплотнительный диск; 6 — впадина; 7 — зуб; 8 — ротор; 10 — стяжные болты; 11 — синхронизирующие шестерни;
12 — ведомый вал; 13 — линия нагнетания; 14 — самодействующий обратный клапан;
МЗ — мертвая зона

вместе с ним проходит мертвую зону МЗ. В линии нагнетания 13 установлен самодействующий обратный клапан 14.

По сравнению с другими типами насосов прямозубый роторный насос имеет такие преимущества, как относительно простая конструкция, значительно сниженная себестоимость производства, минимальные затраты на техническое обслуживание, высокие массогабаритные показатели при сопоставимой производительности, широкий диапазон частоты вращения ($500 \dots 2000 \text{ мин}^{-1}$), стабильность работы в различных режимах эксплуатации, высокая равномерность подачи благодаря постоянной скорости зуба ротора, отсутствие защемленных объемов, повышающее надежность, хорошая всасывающая способность (сравнимая с таковой поршневого насоса) и универсальность применения с различными типами РЖ. Эти преимущества делают прямозубый роторный насос перспективным техническим решением для широкого спектра промышленных применений, где требуется сочетание высокой эффективности, надежности и экономической целесообразности.

Однако конструкция прямозубого роторного насоса с самодействующим обратным клапаном имеет существенные недостатки. Первым из них является наличие подвижных элементов в клапане, что неизбежно приводит к их износу и снижению надежности всей гидросистемы. При клапанном распределении РЖ наблюдается запаздывание открытия клапана вследствие инертности запорного элемента. Это явление провоцирует скачки давления в рабочей камере насоса, что влечет за собой значительные потери при нагнетании РЖ. Особенно критичным становится то, что эти потери возрастают пропорционально увеличению частоты вращения ведущего вала.

Второй недостаток заключается в невозможности объемного регулирования подачи насоса при постоянной частоте вращения. Это снижает его эффективность, так как нельзя адаптировать производительность под текущие потребности. Возникает необходимость применения альтернативных методов регулирования, что сказывается на стоимости и надежности гидросистемы.

В качестве перспективной альтернативы традиционному клапанному распределению предлагается использовать гидродиодное распределение РЖ, где основным элементом явля-

ется гидродиод — устройство проточного типа без подвижных механических элементов [8, 9]. Принцип работы гидродиода основан на создании различного гидравлического сопротивления для потока РЖ в противоположных направлениях. При движении РЖ в прямом направлении гидродиод обеспечивает максимальный расход и минимальное сопротивление, что гарантирует беспрепятственное прохождение РЖ через проточную часть. В случае обратного течения РЖ происходит существенное увеличение гидравлического сопротивления, которое приводит к значительному снижению расхода РЖ.

В прямозубом роторном насосе предлагается заменить самодействующий обратный клапан (см. рис. 1) гидродиодом. В процессе работы насоса РЖ движется через окно нагнетания 4 и гидродиод в прямом направлении с минимальными потерями. При прохождении зуба через мертвую зону происходит соединение окна всасывания с окном нагнетания. Обратное течение РЖ через гидродиод сопровождается значительными потерями энергии, что эффективно ограничивает обратный поток. Таким образом, гидродиод успешно выполняет функции обратного клапана, сохраняя все достоинства статичной конструкции и обеспечивая большую эффективность насосной системы.

Диодность — один из основных параметров, определяющих эффективность гидродиода, — характеризует его способность создавать разное гидравлическое сопротивление при прохождении РЖ в прямом и обратном направлениях. Диодность можно определить [10, 11] по соотношению расходов РЖ в прямом $Q_{\text{пр}}$ и обратном $Q_{\text{обр}}$ направлениях течения потока

$$D_Q = \frac{Q_{\text{пр}}}{Q_{\text{обр}}} \quad (1)$$

и по соотношению коэффициентов сопротивления проточной части при прямом $\xi_{\text{пр}}$ и обратном $\xi_{\text{обр}}$ направлениях течения потока

$$D_\xi = \frac{\xi_{\text{пр}}}{\xi_{\text{обр}}}.$$

Чем выше диодность, тем эффективнее гидродиод. Большая диодность позволяет более эффективно управлять потоками РЖ, особенно при гидродиодном распределении РЖ в насосах.

Анализ современных научных исследований показал, что благодаря высокой диодности

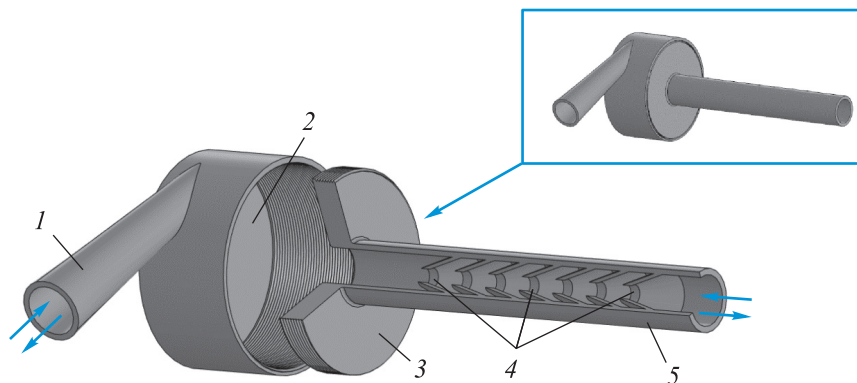


Рис. 2. Внешний вид РВГ

вихревой резисторный гидродиод, разработанный в работе [12], представляет собой наиболее перспективное решение для модернизации прямозубого роторного насоса.

Анализ конструкций вихревых гидродиодов выявил существенный технологический недостаток [13]: большая часть устройств выполнена с фиксированной диодностью без возможности модификации геометрических параметров. Эта особенность создает значительные ограничения в эксплуатации, так как характеристики потока РЖ (в прямом и обратном направлениях) можно регулировать только путем полной замены гидродиода. Это существенно снижает универсальность применения гидродиодов и ограничивает их функциональность в различных гидросистемах.

При использовании гидродиодов в прямозубом роторном насосе изменение диодности становится особенно актуальной задачей. Возможность регулирования диодности позволила бы реализовать объемное регулирование подачи РЖ, что значительно расширило бы спектр применения насосного оборудования такого типа.

Цель статьи — разработка вихревого гидродиода с регулируемой диодностью (регулируемого вихревого гидродиода — РВГ) для прямозубого роторного насоса.

Реализация механизма объемного регулирования подачи насоса может привести к созданию более гибких и универсальных гидросистем, способных адаптироваться под различные эксплуатационные условия без замены основных компонентов. Перспективы развития такой технологии открывают новые возможности для оптимизации работы гидросистем в различных отраслях промышленности, где требуется точное управление потоками РЖ.

Предлагаемый РВГ (рис. 2) включает в себя радиальную трубку 5 с резисторными гидродиодами 4, выполненными в форме полого усеченного конуса. Нижняя крышка 3 обеспечивает герметизацию нижней части вихревой камеры (ВК) 2, тангенциальное сопло 1 расположено на корпусе ВК. Последняя является основным рабочим элементом конструкции, в котором происходит закрутка потока при обратном направлении течения РЖ. Нижняя крышка и ВК связаны резьбовым соединением, что обеспечивает надежность конструкции и возможность регулирования.

Основным преимуществом обновленной конструкции является реализация механизма объемного регулирования, обеспечивающего гибкую настройку рабочих параметров.

Принцип работы регулирующего механизма основан на изменении объема ВК путем уменьшения расстояния между внутренней поверхностью нижней крышки и стенкой ВК. Уменьшение объема ВК приводит к снижению диодности устройства и, наоборот, при увеличении объема ВК диодность возрастает. Объем ВК можно изменять вкручиванием или выкручиванием в ВК нижней крышки с прикрепленной к ней радиальной трубкой. При полном соприкосновении поверхностей нижней крышки и ВК подача РЖ полностью блокируется, что позволяет использовать устройство в качестве эффективного запорного элемента.

Для верификации принятых технических решений необходимо провести комплексный расчет и детальный анализ гидродинамических процессов в проточной части разработанного РВГ, варьируя высоту ВК.

Методика расчета. Течение потока РЖ через проточную часть РВГ — трехмерное со значи-

тельными вязкостными и турбулентными эффектами. Для описания течения потока использованы уравнения Рейнольдса — Навье — Стокса (RANS) [14–16]

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + (\nu + \nu_t) \nabla^2 \mathbf{V}, \quad (3)$$

где $\mathbf{V}$ — вектор скорости течения РЖ; ρ — постоянная плотность несжимаемой РЖ; p — статическое давление; ν — кинематическая вязкость РЖ; ν_t — турбулентная вязкость РЖ, заданная полуэмпирической моделью турбулентности.

Систему уравнений (2)–(3) следует решать при различных геометрических размерах проточной части РВГ, что требует значительных вычислительных затрат и времени. Поэтому необходимо, чтобы модель турбулентности, определяющая распределение турбулентной вязкости ν_t , обеспечивала баланс между точностью и вычислительной эффективностью. Результаты исследований показывают [9, 17], что для вихревых гидродиодов эффективнее использовать уравнения RANS в сочетании с моделью турбулентности Reynolds Stress Models (RSM). Такой подход обеспечивает минимальное отклонение расчетных данных от экспериментальных.

Система уравнений (2)–(3) в общем случае не поддается аналитическому решению и требует применения численных методов. Среди них можно выделить метод конечных объемов, обеспечивающий оптимальное сочетание точности и эффективности вычислений. На его основе создано много современных программных комплексов для инженерного анализа, включая ABAQUS, ANSYS и COMSOL Multiphysics. В силу указанных достоинств для численного моделирования течения РЖ в про-

точной части РВГ выбран метод конечных объемов.

Для изучения влияния геометрических параметров на характеристики диодности РВГ созданы вычислительные модели с использованием CFD-кода FLUENT. Моделирование проведено при различных значениях высоты ВК (см. рис. 2). В качестве основного инструмента расчетов выступал коммерческий CFD-пакет ANSYS FLUENT, реализующий модель турбулентности RSM, что позволило получить достоверные результаты исследования.

Схема расчета течения потока в проточной части РВГ приведена на рис. 3, где приняты следующие основные размеры: $N = 7$; $\alpha = 20^\circ$; $\beta = 160^\circ$; $D = 66$ мм; $\Omega = 10$ мм; $M = 35$ мм. Высота ВК h задана в диапазоне 5...40 мм с шагом 5 мм.

Моделирование проточной части РВГ проведено в программном комплексе ANSYS ICEM CFD, который позволил создать точную трехмерную модель исследуемого устройства с учетом всех конструктивных особенностей. Структурирование расчетной области выполнено путем построения тетраэдрической неструктурированной сетки. Пограничный слой включал в себя не менее двенадцати слоев плоских ячеек, что обеспечило высокую точность определения сдвигового течения РЖ вблизи стенок проточной части.

Верификация расчетной сетки проведена путем анализа сеточной сходимости. В результате проведенных исследований определена оптимальная размерность конечных элементов, составившая 0,0006 м, что позволило достичь приемлемого баланса между точностью и вычислительными затратами.

Расчетная сетка модели проточной части РВГ при высоте ВК $h = 40$ мм, показанная на рис. 4, демонстрирует качество дискретизации расчетной области и позволяет оценить рас-

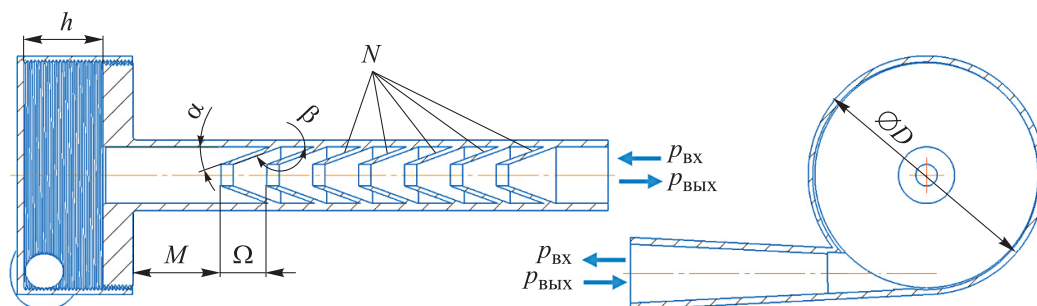


Рис. 3. Схема расчета течения потока в проточной части РВГ

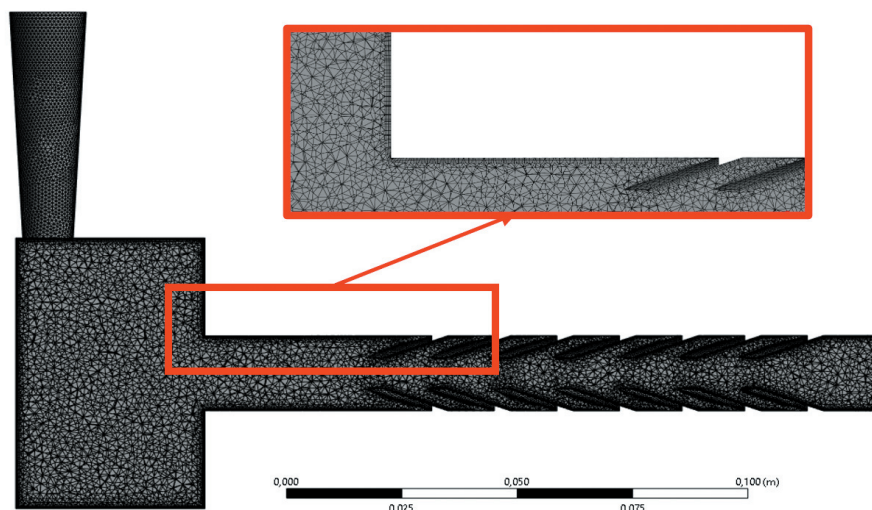


Рис. 4. Расчетная сетка модели проточной части РВГ при высоте ВК $h = 40$ мм

пределение элементов сетки в различных зонах проточной части.

Диодность определяли по формуле (1) при постоянном перепаде давления и разным объемом ВК. Входное давление в РВГ $p_{\text{вх}}$ принимали равным 500 кПа, а выходное $p_{\text{вых}}$ — 101,325 кПа (см. рис. 3). Расчет начинали при скорости течения РЖ $V = 0$ и заканчивали при установлении квазистационарного режима. Согласно результатам исследования [18], вязкость РЖ оказывает незначительное влияние на диодность вихревых устройств, что позволило использовать в качестве РЖ воду. При температуре 20 °C вода имела следующие физические свойства: плотность $\rho = 998,2$ кг/м³; кинематическая вязкость $\nu = 1,002 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Для решения системы уравнений, описывающих течение потока РЖ, применен алгоритм SIMPLE, обеспечивающий эффективную связь между полями давления и скорости течения.

При постановке граничных условий для характеристик турбулентности параметр ее интенсивности выбран равным 5 % [19].

Направление движения РЖ (прямого или обратного) задавали геометрическим положением входной и выходной границ РВГ в соответствии с рис. 3. На внутренних поверхностях РВГ принято граничное условие прилипания стенки со стандартными значениями константы шероховатости.

Результаты численного эксперимента. В ходе численного эксперимента получена зависимость диодности по расходу D_Q от высоты ВК h , приведенная на рис. 5. Видно, что при увеличении вы-

соты ВК происходит монотонное возрастание диодности по расходу D_Q с характерным участком замедления роста в диапазоне $h = 30 \dots 40$ мм. При достижении высоты $h = 40$ мм наблюдается максимальное значение диодности по расходу, дальнейшее увеличение высоты ВК не оказывает существенного влияния на D_Q .

В области малых значений высоты ВК ($h < 5$ мм) диодность по расходу D_Q снижается до нуля. Это обусловлено механическим перекрытием входного сечения тангенциального сопла (см. рис. 2), что приводит к прекращению потока РЖ в обоих направлениях.

Таким образом, изменение высоты ВК позволяет плавно регулировать диодность по расходу в диапазоне до 20 % максимального значения. Кроме того, при необходимости, РВГ может полностью перекрыть потоки РЖ в прямом и обратном направлениях, и диодность становится равной нулю. Эта особенность делает разработанный РВГ перспективным регулирующим элементом гидросистемы.

Распределения линий тока и скоростей течения РЖ в проточной части РВГ при прямом направлении течения потока и высоте ВК $h = 5$

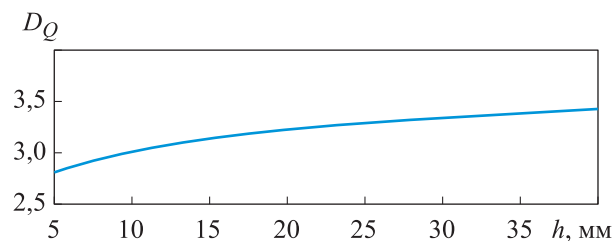


Рис. 5. Зависимость диодности по расходу D_Q от высоты ВК h

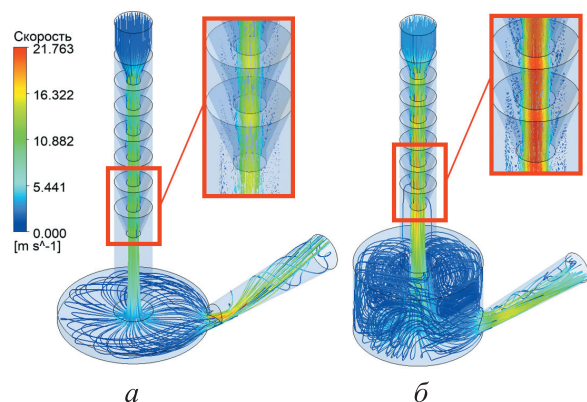


Рис. 6. Распределения линий тока и скоростей течения РЖ (увеличенный участок) в проточной части РВГ при прямом направлении течения потока и высоте ВК $h = 5$ (а) и 40 мм (б)

и 40 мм показаны на рис. 6, а и б. Видно, что при $h = 5$ и 40 мм картины течения РЖ в трубке с резисторными диодами диафрагменного типа различаются несущественно, однако скорость течения РЖ при $h = 5$ мм меньше, чем при $h = 40$ мм. Это обусловлено следующим: в РВГ при $h = 5$ мм нижняя крышка ВК частично перекрывает входное отверстие тангенциального сопла в месте соединения с ВК, что приводит к дополнительным гидравлическим потерям (внезапное расширение в трубопроводе) и уменьшению скорости течения РЖ. При $h = 40$ мм РЖ выходит из трубки с резисторными диодами диафрагменного типа в ВК, где заполняет весь объем с образованием осевых вихрей и далее устремляется ко входу в тангенциальное сопло через сечение большей площади. Осевые вихри не препятствуют движению основного потока, что уменьшает гидравлические потери и приводит к увеличению расхода и скорости течения РЖ.

Зависимости массового расхода РЖ в прямом $M_{пр}$ и обратном $M_{обр}$ направлениях течения РЖ от высоты ВК h показаны на рис. 7. Видно, что при увеличении высоты ВК происходит существенный рост массового расхода РЖ в прямом направлении $M_{пр}$. В то же время изменение массового расхода РЖ в обратном направлении $M_{обр}$ характеризуется значительно меньшей интенсивностью при аналогичных изменениях параметра h . Таким образом, установлено существенное различие в характере зависимости массового расхода РЖ от высоты ВК для противоположных направлений течения РЖ.

Распределения линий тока и скоростей течения РЖ в проточной части РВГ при обратном

направлении течения потока и высоте ВК $h = 5$ и 40 мм показаны на рис. 8, а и б. Видно, что картины течения жидкости в трубке с резисторными диодами диафрагменного типа для двух рассматриваемых случаев почти не различаются, однако скорость течения РЖ при $h = 40$ мм немного больше, чем при $h = 5$ мм. При обратном направлении течения РЖ основные потери происходят за счет интенсивного закручивания потока в цилиндрической камере, что наблюдается как для $h = 5$ мм, так и для $h = 50$ мм. При $h = 5$ мм и обратном направлении течения РЖ закрутка потока в ВК происходит с большей интенсивностью, чем при $h = 40$ мм, что приводит к значительным гидравлическим потерям.

Увеличенная интенсивность закрутки потока при $h = 5$ мм обусловлена меньшим объемом ВК. При $h = 40$ мм поток выходит из тангенциального сопла и, двигаясь далее по внешним стенкам ВК, образует радиальный вихрь, который заполняет весь объем ВК. При увеличении высоты ВК интенсивность радиального вихреобразования становится существенно ниже, чем при высоте $h = 5$ мм. Это приводит к заметному возрастанию как скорости течения потока, так и расхода РЖ через ВК.

Результаты количественного исследования, приведенные на рис. 7, наглядно демонстрируют данную зависимость. Важно отметить существенное различие в характере изменения расхода РЖ в прямом и обратном направлениях течения потока. Также следует выделить то, что при изменении высоты ВК с 5 до 40 мм расход РЖ в режиме обратного течения потока возрастает на 35 %, а в режиме прямого течения — на 62 %. Это подтверждает асимметричный

$M_{пр}; M_{обр}, \text{кг/с}$

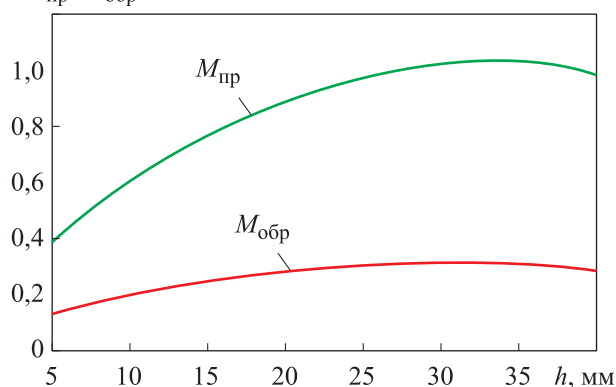


Рис. 7. Зависимости массовых расходов РЖ в прямом $M_{пр}$ и обратном $M_{обр}$ направлениях от высоты ВК h

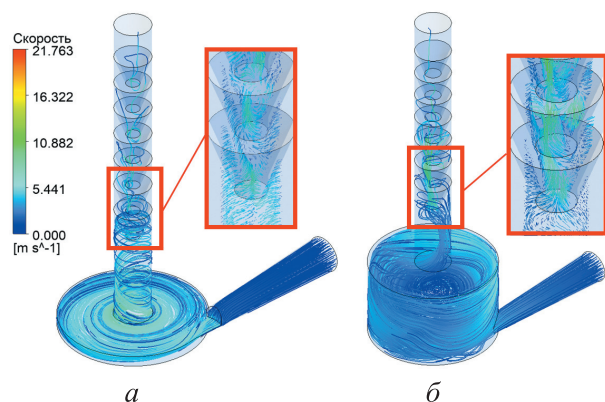


Рис. 8. Распределения линий тока и скоростей течения РЖ (увеличенный участок) в проточной части РВГ при обратном направлении течения потока и высоте ВК $h = 5$ (а) и 40 мм (б)

характер работы ВК и ее диодоподобные свойства.

Кроме того, значительное увеличение расхода РЖ в прямом направлении и незначительное в обратном позволяют осуществлять объемное регулирование подачи прямозубого роторного насоса с сохранением гидродиодного эффекта.

Выводы

1. По результатам анализа работы прямозубого роторного насоса предложено заменить обратный клапан на РВГ. Такое техническое решение не только обеспечивает не только высокие технические и эксплуатационные показатели насоса, но и возможность объемного регулирования его подачи. Реализация такого ре-

шения существенно расширяет область применения прямозубых роторных насосов. Кроме того, РВГ, как отдельное устройство, может выступать аналогом регулируемых гидравлических дросселей.

2. Выполнен расчет течения РЖ в проточной части РВГ при варьировании высоты ВК. Результаты моделирования продемонстрировали высокую эффективность предложенного подхода к регулированию характеристик РВГ. Установлено, что, изменяя высоту ВК, можно плавно управлять диодностью в широком интервале — от максимального значения до полного прекращения потока РЖ через РВГ. Диапазон плавного регулирования достигает 20 % максимального значения диодности по расходу, что существенно расширяет возможности практического применения РВГ. Полученные результаты полностью подтверждают корректность выбранных технических решений и открывают перспективы для дальнейшего совершенствования конструкции РВГ.

3. Проведен анализ течения РЖ в проточной части РВГ при двух значениях высоты ВК. Показано, что высота ВК существенно влияет на расход РЖ в прямом направлении течения потока, который с ее уменьшением резко падает. Расход РЖ при обратном направлении течения потока с изменением высоты ВК изменяется незначительно. Таким образом, можно осуществлять объемное регулирование подачи РЖ в прямом направлении с сохранением концепции гидродиодного распределения в прямозубом роторном насосе.

Литература

- [1] Yazar M. Comparative efficiency and performance analysis of spur gear and non-circular (square) gear hydraulic pumps. *Flow Meas. Instrum.*, 2025, vol. 102, art. 102817, doi: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2025.102817>
- [2] Załuski P. Influence of fluid compressibility and movements of the swash plate Axis of rotation on the volumetric efficiency of axial piston pumps. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 1, art. 298, doi: <https://doi.org/10.3390/en15010298>
- [3] Шейпак А.А. История создания насосов и механика жидкости (посвящается столетию кафедры Э10 МГТУ имени Н.Э. Баумана). *Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 5. EDN: UBXQYZ
- [4] Габдулов И.Н. Анализ радиально-поршневого и аксиально-поршневого насосов объемного действия. *Вопросы науки и образования*, 2019, № 25, с. 4–6.
- [5] Ахмедова Н.Р., Левичева О.И., Наумов В.А. Оценка рабочих характеристик установок для подачи высоковязких пищевых масс с помощью кулачковых насосов российского производства. *Известия КГТУ*, 2024, № 72, с. 41–56.
- [6] Григорьев А.В., Щерба В.Е., Калашников Б.А. и др. Экспериментальные исследования прямозубого роторного насоса. *Омский научный вестник*, 2012, № 2, с. 152–156.

- [7] Grigor'ev A.V., Shcherba V.E., Bolshtyanskii A.P. Mathematical modeling of the working processes in a bicylindrical spur gear pump. *Chem. Petrol. Eng.*, 2015, vol. 51, no. 1–2, pp. 113–121, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-015-0009-0>
- [8] Кайгородов С.Ю. Экспериментальное подтверждение возможности применения гидравлического диода в линии нагнетания прямозубого роторного насоса. *Вестник машиностроения*, 2020, № 4, с. 56–58, doi: <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-4-56-58>
- [9] Цветков И.В., Кайгородов С.Ю., Павлюченко Е.А. и др. Разработка и исследование вихревого гидродиода повышенной диодности для специальной техники военного назначения. *Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму*, 2021, № 5–6, с. 131–142.
- [10] Shcherba V.E., Kaigorodov S., Dorofeev E. et al. Development and research of diaphragm hydrolic diode for positive displacement pumps. *Mech. Based Des. Struc.*, 2025, vol. 53, no. 1, pp. 702–721, doi: <https://doi.org/10.1080/15397734.2024.2374452>
- [11] Спиридонов Е.К., Хабарова Д.Ф. Расчетная модель и характеристики бесклапанного поршневого насоса одностороннего действия. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение*, 2014, № 4, с. 13–22.
- [12] Pavlyuchenko E.A., Grigoriev A.V., Kaigorodov S.Yu. et al. Aspects of the numerical simulation of high-diode vortex hydrodiodes. *Chem. Petrol. Eng.*, 2023, vol. 59, no. 4, pp. 340–346, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-023-01247-9>
- [13] 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>
- [14] Коптев А.В. Как разрешить 3D уравнения Навье-Стокса. *Известия РГПУ им. А.И. Герцена*, 2015, № 173, с. 7–15.
- [15] Chen S., Li X. Finite volume element methods for a multi-dimensional fracture model. *J. Comput. Appl. Math.*, 2022, vol. 406, art. 114028, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2021.114028>
- [16] Yin J., Jiao L., Wang L. Large eddy simulation of unsteady flow in vortex diode. *Nucl. Eng. Des.*, 2010, vol. 240, no. 5, pp. 970–974, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.01.010>
- [17] 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>
- [18] Сокирко К.Н., Павлюченко Е.А., Цветков И.В. Анализ влияния основных геометрических параметров вихревого гидродиода на его параметры. *Совершенствование систем эксплуатации и восстановления вооружения и военной техники. Роль качества подготовки военных специалистов технического обеспечения. Мат. XII Всерос. науч.-практ. конф.* Омск, ОБИИ, 2024, с. 277–284.
- [19] Kulkarni A.A., Ranade V.V., Rajeev R. et al. CFD simulation of flow in vortex diodes. *AIChE J.*, 2008, vol. 54, no. 5, pp. 1139–1152, doi: <https://doi.org/10.1002/aic.11439>

References

- [1] Yazar M. Comparative efficiency and performance analysis of spur gear and non-circular (square) gear hydraulic pumps. *Flow Meas. Instrum.*, 2025, vol. 102, art. 102817, doi: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2025.102817>
- [2] Załuski P. Influence of fluid compressibility and movements of the swash plate Axis of rotation on the volumetric efficiency of axial piston pumps. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 1, art. 298, doi: <https://doi.org/10.3390/en15010298>
- [3] Sheypak A.A. The History of Pump Development and Fluid Mechanics (dedicated to the centenary of Department E10 of Bauman Moscow State Technical University). *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman* [Science & Education of the Bauman MSTU], 2015, no. 5. EDN: UBXQYZ (in Russ.).
- [4] Gabdulov I.N. Analysis of radial piston and axial piston positive-displacement pumps. *Voprosy nauki i obrazovaniya*, 2019, no. 25, pp. 4–6. (In Russ.).

- [5] Akhmedova N.R., Levicheva O.I., Naumov V.A. Performance evaluation of high-viscosity food masses feeding installations using Russian-made lobe pumps. *Izvestiya KGTU* [KSTU News], 2024, no. 72, pp. 41–56. (In Russ.).
- [6] Grigoryev A.V., Shcherba V.E., Kalashnikov B.A. et al. Experimental research of spur gear rotor pump. *Omski nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2012, no. 2, pp. 152–156. (In Russ.).
- [7] Grigor'ev A.V., Shcherba V.E., Bolshtyanskii A.P. Mathematical modeling of the working processes in a bicylindrical spur gear pump. *Chem. Petrol. Eng.*, 2015, vol. 51, no. 1–2, pp. 113–121, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-015-0009-0>
- [8] Kaygorodov S.Yu. Experimental confirmation of the possibility of using a hydraulic diode in the discharge line of a spur rotary pump. *Vestnik mashinostroeniya*, 2020, no. 4, pp. 56–58, doi: <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-4-56-58> (in Russ.).
- [9] Tsvetkov I.V., Kaygorodov S.Yu., Pavlyuchenko E.A. et al. Development and research of a high — yield vortex hydrodiode for special military equipment. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Military Enginery Scientific and Technical Journal. Counter-Terrorism Technical Devices. Issue 16], 2021, no. 5–6, pp. 131–142. (In Russ.).
- [10] Shcherba V.E., Kaigorodov S., Dorofeev E. et al. Development and research of diaphragm hydrolic diode for positive displacement pumps. *Mech. Based Des. Struc.*, 2025, vol. 53, no. 1, pp. 702–721, doi: <https://doi.org/10.1080/15397734.2024.2374452>
- [11] Spiridonov E.K., Khabarova D.F. Calculating model and characteristics single action valveless piston pump. *Vestnik YuUrGU. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry], 2014, no. 4, pp. 13–22. (In Russ.).
- [12] Pavlyuchenko E.A., Grigoriev A.V., Kaigorodov S.Yu. et al. Aspects of the numerical simulation of high-diode vortex hydrodiodes. *Chem. Petrol. Eng.*, 2023, vol. 59, no. 4, pp. 340–346, doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-023-01247-9>
- [13] 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>
- [14] Koptev A.V. How to solve 3D Navier - Stokes equations. *Izvestiya RGPU im. A.I. Gertsena* [Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences], 2015, no. 173, pp. 7–15. (In Russ.).
- [15] Chen S., Li X. Finite volume element methods for a multi-dimensional fracture model. *J. Comput. Appl. Math.*, 2022, vol. 406, art. 114028, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2021.114028>
- [16] Yin J., Jiao L., Wang L. Large eddy simulation of unsteady flow in vortex diode. *Nucl. Eng. Des.*, 2010, vol. 240, no. 5, pp. 970–974, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.01.010>
- [17] 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.).
- [18] Sokirko K.N., Pavlyuchenko E.A., Tsvetkov I.V. [Analysis of the influence of the main geometric parameters of a vortex hydrodiode on its parameters]. *Sovershenstvovanie sistem ekspluatatsii i vosstanovleniya vooruzheniya i voennoy tekhniki. Rol kachestva podgotovki voennykh spetsialistov tekhnicheskogo obespecheniya. Mat. XII Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Improving Systems for the Operation and Restoration of Weapons and Military Equipment. The Role of Quality Training for Military Technical Support Specialists. Proc. XII Russ. Sci.-Pract. Conf.]. Omsk, OABII Publ., 2024, pp. 277–284. (In Russ.).
- [19] Kulkarni A.A., Ranade V.V., Rajeev R. et al. CFD simulation of flow in vortex diodes. *AIChE J.*, 2008, vol. 54, no. 5, pp. 1139–1152, doi: <https://doi.org/10.1002/aic.11439>

Статья поступила в редакцию 20.10.2025

Информация об авторах

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).

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).

ПАВЛЮЧЕНКО Александра Сергеевна — преподаватель кафедры «Двигатели». Омский автобронетанковый инженерный институт (филиал) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева (644098, Омск, Российская Федерация, 14-й Военный городок, e-mail: sanjaomsk@mail.ru).

Information about the authors

PAVLYUCHENKO Evgeniy 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).

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).

PAVLYUCHENKO Alexandra Sergeevna — Lecturer, Department of Engines. Omsk Armored Engineering Institute (Branch) The Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev (644098, Omsk, Russian Federation, 14th Military Town, e-mail: sanjaomsk@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Павлюченко Е.А., Кайгородов С.Ю., Павлюченко А.С. Гидродiodeное регулирование подачи жидкости в прямозубом роторном насосе. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 6, с. 85–95.

Please cite this article in English as:

Pavlyuchenko E.A., Kaigorodov S.Y., Pavlyuchenko A.S. Hydrodiode control of liquid supply in a straight-tooth rotary pump. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 6, pp. 85–95.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие**

«Взаимозаменяемость и нормирование точности соединений деталей и сборочных единиц»

Авторы: В.В. Быков, К.В. Васильева, М.И. Голубев

Приведена теоретическая и практическая часть, необходимая для изучения основных принципов взаимозаменяемости и нормирования точности соединений деталей и сборочных единиц. Нормирование точности рассмотрено на примере узла автомобиля КамАЗ 4310.

Для студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана, изучающих дисциплину «Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения».

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>