

9. Engineering Essentials: Hydraulic Motor Circuits [Electronic resource]. – A staff report. – Hydraulics & Pneumatics, 2012. – Available at: <http://hydraulicspneumatics.com/200/TechZone/HydraulicPumpsM/Article/False/6472/TechZone-HydraulicPumpsM>
10. Ho, T. H. Speed Control of a Hydraulic Pressure Coupling Drive Using an Adaptive Fuzzy Sliding-Mode Control [Text] / T. H. Ho, K. K. Ahn // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2012. – Vol. 17, Issue 5. – P. 976–986. doi: 10.1109/tmech.2011.2153866
11. Xu, B. Energy saving of cutterhead hydraulic drive system of shield tunneling machine [Text] / B. Xu, R. Ding, J. Zhang, M. Cheng, T. Sun // Automation in Construction. – 2015. – Vol. 57. – P. 98–111. doi: 10.1016/j.autcon.2015.04.012
12. Shi, H. Energy saving of cutterhead hydraulic drive system of shield tunneling machine [Text] / H. Shi, H. Yang, G. Gong, H. Liu, D. Hou // Automation in Construction. – 2014. – Vol. 37. – P. 11–21. doi: 10.1016/j.autcon.2013.09.002
13. Поліщук, Л. К. Вибір параметрів вмонтованого гідравлічного приводу з пристроєм керування [Текст] / Л. К. Поліщук, О. О. Адлер, М. Салех. – Машинознавство. – 2010. – № 6. – С. 36–40.
14. Polishchuk, L. Mathematical modeling of dynamic processes of control device of hydraulic drive of belt conveyor with variable load [Text] / L. Polishchuk, O. Koval // Tehnomus. New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies. – 2015. – Issue 1. – P. 141–147.
15. Поліщук, Л. К. Вмонтовані гідравлічні приводи конвеєрів з гнучким тяговим органом, чутливі до зміни навантаження [Текст]: монографія / Л. К. Поліщук, О. О. Адлер. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 184 с.
16. Іскович-Лотоцький, Р. Д. Генератори імпульсів тиску для керування гідроімпульсними приводами вібраційних та віброударних технологічних машин [Текст]: монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Р. Р. Обертюх, М. Р. Архипчук. – Вінниця, 2008. – 171 с.
17. Пат. 68816 України, МПК8 В65G 23/00. Керований гідравлічний мотор-барабан [Текст] / Поліщук Л. К., Обертюх Р. Р., Харченко Є. В., Адлер О. О., Кислиця Д. В. – заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201111872; заявл. 10.10.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7.

Наведено результати теоретичних досліджень по визначенню основних характеристик оригінальних конічних вихрових діодів для захисту трубопроводів від гідравлічних ударів. Дано опис конструкції діода, стенда та методики проведення експериментів. Отримані дослідні дані узгоджуються з розрахованими значеннями діодності та постійної часу, що підтверджує достовірність математичної моделі робочого процесу пристрою

Ключові слова: гідравлічний гідравлічний удар, захист трубопроводу, гідравлічний опір, діодність, вихровий діод, експериментальні характеристики вихрового діода

Приведены результаты теоретических исследований по определению основных характеристик оригинальных конических вихревых диодов для защиты трубопроводов от гидравлических ударов. Дано описание конструкции диода, стенда и методики проведения экспериментов. Полученные опытные данные согласуются с рассчитанными значениями диодности и постоянной времени, что подтверждает достоверность математической модели рабочего процесса устройства

Ключевые слова: гидравлический удар, защита трубопровода, гидравлическое сопротивление, диодность, вихревой диод, экспериментальные характеристики вихревого диода

УДК 621.646.942

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.65996

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВИХРЕВОГО ДИОДА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ГИДРОУДАРОВ

М. В. Оверко

Соискатель

Кафедра горных машин и
мехатронных систем машиностроения

Донецкий национальный
технический университет

ул. Шибанкова, 2,

г. Красноармейск, Украина, 85300

E-mail: overko@mail.ua

1. Введение

Защита от гидравлических ударов считается необходимым мероприятием на всех напорных водоводах и должна обеспечиваться комплексом нормативных мер, которые включают в себя как технологические

требования, например плавное закрытие задвижки на выходе насоса перед его отключением, так и установку специальной предохранительной аппаратуры, которая срабатывает в аварийных режимах, возникающих в результате ошибок персонала, внезапного отключения электроэнергии, механических поломок регулирую-

щей арматуры и т. п. В качестве предохранительной аппаратуры на напорных насосных установках применяются воздушные колпаки, гасители гидравлических ударов, переливные колонны. Все эти устройства дороги в изготовлении, требуют регулярного ухода в процессе эксплуатации. В случае, когда основной причиной гидравлического удара является внезапное отключение насоса, для защиты трубопровода возможно применение крупногабаритных гидравлических или струйных диодов, причем последние предпочтительнее, так как они не имеют подвижных элементов и, следовательно, более надежны в работе, что важно для предохранительной арматуры. Известен положительный опыт применения крупногабаритного струйного диода для этой цели на деривационном водоводе гидроэлектростанции [1]. Существуют методики, позволяющие рассчитать диодность такого устройства [2], но только классической конструкции.

Поэтому обоснование рациональных параметров рабочих процессов и областей применения вихревых диодов в качестве средств защиты водонапорных установок от гидравлических ударов является актуальной научной задачей.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Выключение насосного агрегата считается наиболее распространенной причиной опасных колебаний давления. И хотя по правилам технической эксплуатации насосных установок остановка насоса должна сопровождаться предварительным закрытием задвижки на выходе, это не всегда соблюдается, например, из-за несанкционированного отключения электропитания приводных двигателей или в связи с аварийной ситуацией в месте потребления транспортируемой жидкости. Гидравлический удар при этом протекает со значительной амплитудой по давлению и может быть опасным.

Из известных способов защиты от гидравлических ударов, возникающих при отключении насосного агрегата, является увеличение гидравлического сопротивления напорного трубопровода при обратном токе жидкости, что приводит к рассеиванию энергии волны повышенного давления [3]. Привлекательность данного метода защиты заключается в его простоте, однако на практике реализация сопряжена с рядом трудностей.

Технологически изготовить трубу с различным сопротивлением при разнонаправленном потоке в современных условиях представляется слишком дорогим, а использование клапанов с отверстиями или байпасами сопряжено с уменьшением надёжности. Следовательно, трубопровод необходимо снабжать устройствами без подвижных элементов и имеющими минимальное гидравлическое сопротивление при прямом токе жидкости и максимальное – при обратном. Такими устройствами являются струйные диоды.

Струйным диодом, обладающим наибольшей эффективностью, является вихревой диод. В настоящее время вихревые диоды используются в качестве гидродинамических регуляторов и дросселей для систем подготовки проб теплоносителя на тепловых электростанциях [4], и в качестве замены обратных клапанов объемных насосов в кислотной и абразивной среде [5].

Теоретически и экспериментально струйные диоды исследовались многими учеными [2, 6–8]. В настоящее время все большее распространение получают численные методы анализа, в частности, метод конечных элементов. При этом полученные результаты, как правило, подтверждают экспериментально [9]. Однако максимальная диодность, как основной параметр, характеризующий качество диода, колеблется в широких пределах от 10 до 50 [10, 11]. В результате исследования вихревого диода [9] получена диодность 27 на образце, изготовленном с использованием технологии 3D печати, что позволило получить бесшовную конструкцию, которая после соответствующей обработки имеет шероховатость до 0,07 мм. В эксперименте [10] достигнута диодность вихревого диода 10, при этом очевидно некоторое нарушение его форм и сопряжений. Достоверно оценить влияние шероховатости внутренних поверхностей на рабочий процесс по имеющимся данным не представляется возможным. Исследования, посвященные крупногабаритным вихревым диодам, выполняются редко и не находят широкого освещения в литературе [1, 2].

С учетом изложенного основные параметры созданного конического вихревого диода экспериментально определялись на натурном образце, изготовленном из стали, что соответствует предполагаемой области его применения и диапазону выполненных теоретических исследований.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является получение экспериментальных данных для подтверждения адекватности результатов моделирования рабочего процесса вихревого диода как средства предотвращения гидравлических ударов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- подтвердить адекватность выбранной математической модели рабочего процесса вихревого диода допустимой схожимостью расчетных и экспериментально полученных статических и динамических характеристик;

- подтвердить возможность использования вихревого диода в качестве средства предотвращения гидравлических ударов сопоставлением времени формирования вихря (постоянной времени вихревого диода) с фазой переходного процесса.

4. Материалы и методы исследований

4.1. Оборудование испытательного стенда

Экспериментальные исследования проводились на стенде, оборудованном насосами типа DK20 и DTm – 18, трубами и поворотными кранами с условным проходом 50 мм. В качестве регистрирующей аппаратуры применялись манометры класса точности 0,4 %, преобразователь давления «Сапфир 22-ДИ», аналого-цифровой преобразователь NI USB 6008 программа LabVIEW.

В качестве исследуемого устройства использован натурный образец вихревого диода [12] с условным проходом 50 мм, выполненный из Ст. 3 толщиной 3 мм.

4. 2. Методика и порядок проведения исследований вихревого диода по определению диодности

В Донецком национальном техническом университете (Украина) создана защищенная патентом [12] конструкция вихревого диода, которая удовлетворяет следующему ряду технологических и параметрических требований: ограниченный размер в плане, соответствие размеров стандартному ряду, максимальное проходное сечение, минимальное прямое гидравлическое сопротивление (рис. 1, 2).

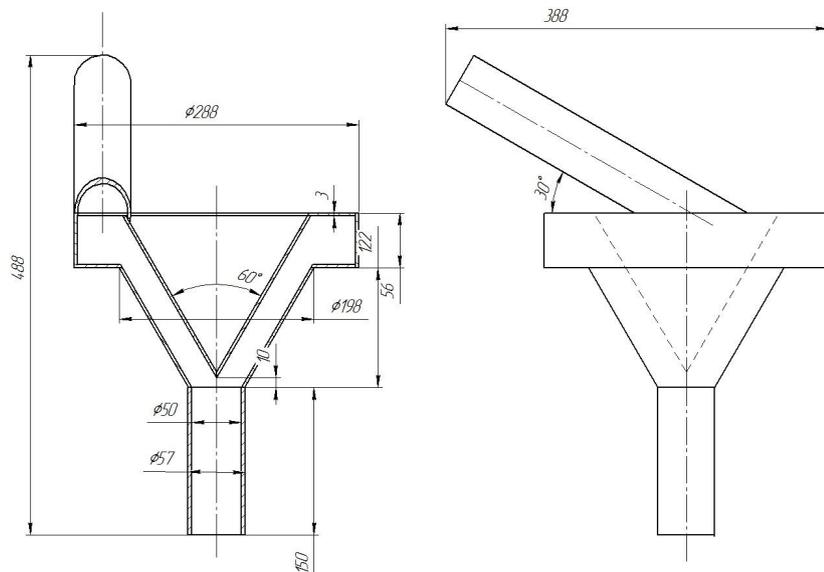


Рис. 1. Конструкция вихревого диода



Рис. 2. Натурный образец вихревого диода

Моделирование рабочего процесса осуществляется на основе численного решения уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS) (1) [13].

$$\rho \frac{\partial \overline{u_j u_i}}{\partial x_j} = \rho \overline{f_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\overline{\rho \delta_{ij}} + \mu \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i' u_j'} \right]. \quad (1)$$

Систему уравнений Рейнольдса замыкает модель турбулентности SST (ShearStressTransport).

Условия однозначности выглядят следующим образом: вода как рабочая жидкость, плотность $\rho=1000 \text{ кг/м}^3$, кинематическая вязкость $\nu=1,006 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, температура $t=20^\circ \text{ C}$; скорость потока на входе в расчетную область $v_{\text{вх}}=v_1$; давление на выходе из расчетной области $p_{\text{вых}}=p_a=101325 \text{ Па}$; скорость потока у всех боковых поверхностей $v_{\text{ст}}=0$.

Геометрические параметры вихревого диода, движение жидкости в котором моделировались, соответствовали параметрам, используемым для экспериментальных исследований (рис. 3).

Экспериментальный стенд для исследования напорных характеристик вихревого диода при прямом и обратном направлении течения потока был собран в условиях учебной лаборатории кафедры «Энергомеханические системы» ГВУЗ «ДонНТУ» (Украина) (рис. 4) и включал в себя элементы, приведенные ниже.

Цилиндрическая емкость 1 объемом $0,6 \text{ м}^3$ соединена с насосами 2,3 через краны 4,5 и соответствующие подводящие трубопроводы, выполненные из жесткой полиэтиленовой трубы с условным проходом 50 мм, которая использовалась на напорной части стенда. В качестве насоса 2 использовался насос типа 2 ДК20, имеющий номинальную подачу 550 л/мин при номинальном напоре 25 м, частота вращения ротора насоса 2850 мин^{-1} , мощность двигателя 1500 Вт, напряжение питания 220 В. Насос 3 типа DTm – 18, имеющий номинальную подачу 420 л/мин при номинальном напоре 18 м, частота вращения ротора насоса 2850 мин^{-1} , мощность двигателя 1100 Вт, напряжение питания 220 В. Краны 6 и 7 позволяли получать параллельное или последовательное соединение насосов, что расширяло область изменения скоростей движения воды. Кран 8 находился в положении «закрыто» и не использовался в данной серии опытов. Напорные трубопроводы от насоса 2 и насоса 3 соединялись посредством тройника с последующим вводом в полости вихревого диода 9, который в данном случае установлен на обратное течение, то есть создает максимальное гидравлическое сопротивление. После вихревого диода 9 вода возвращалась в резервуар 1 по трубопроводу 10. Расход воды в системе определялся с помощью диафрагмы 11 (относительная площадь сужающего устройства $m_{11}=0,49$) и сопла Вентури 12 ($m_{12}=0,41$) падение напора на которых измерялось дифференциальным манометром 13 типа ДМ-50. Падение давления на вихревом диоде измерялось образцовыми манометрами 17 ($0-6 \text{ кгс/см}^2$) и 16 ($0-1 \text{ кгс/см}^2$), манометр 14 – использовался как справочный и показывал давление на выходе насоса 3, манометр 15 – резервный.

При монтаже и установке нормальной диафрагмы, сопла Вентури и контрольно – измерительных приборов учтены действующие требования и рекомендации [14].

При работе одного насоса 2 краны 4 и 6 были открыты, а остальные краны находились в закрытом положении. Изменение расхода достигалось изменением угла поворота крана 6. Определение расхода осуществ-

влялось с помощью сопла Вентури 12. Максимальное значение расхода при этом достигало $0,007 \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствует скорости воды во входном сечении диода $3,5 \text{ м/с}$.

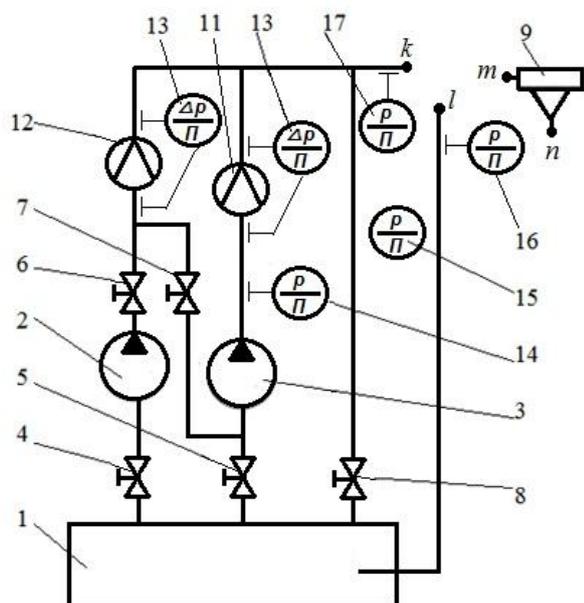


Рис. 3. Схема экспериментального стенда с вихревым диодом: 1 – цилиндрическая емкость объемом $0,6 \text{ м}^3$; 2, 3 – насосы; 4, 5, 6, 7, 8 – краны; 9 – вихревой диод; 10 – трубопровод; 11 – диафрагма (35 мм); 12 – сопло Вентури (32,5 мм); 13 – дифференциальный манометр типа ДМ – 50; 14, 15, 16, 17 – манометры



Рис. 4. Экспериментальный стенд с вихревым диодом: 1 – цилиндрическая емкость объемом $0,6 \text{ м}^3$; 2, 3 – насосы; 4, 5, 6, 7, 8 – краны; 9 – вихревой диод; 10 – трубопровод; 11 – диафрагма (35 мм); 12 – сопло Вентури (32,5 мм); 13 – дифференциальный манометр типа ДМ – 50; 14, 15, 16, 17 – манометры

При параллельном соединении насосов краны 6, 8 оставались закрытыми, остальные краны открывались. Определение расхода осуществлялось с помощью сопла Вентури 12 и диафрагмы 13. Максимальный полученный расход при этом составил $0,0112 \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствует скорости воды во входном сечении диода $5,7 \text{ м/с}$.

При последовательном соединении насосов краны 7, 8 оставались закрытыми, остальные краны открывались. Определение расхода осуществлялось с помощью диафрагмы 13. Максимальный полученный расход при этом составил $0,0075 \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствует скорости воды во входном сечении диода $3,8 \text{ м/с}$.

Испытания вихревого диода проведены в следующем объеме и последовательности:

а) получение данных для расходной характеристики вихревого диода при обратном токе (подразумевается течение жидкости в направлении, соответствующем максимальному гидравлическому сопротивлению), при этом точка m подключения диода 9 соединяется с точкой k на трубопроводе стенда, а точка n соединяется с точкой l;

б) получение данных для расходной характеристики вихревого диода при прямом течении жидкости осуществляется при соединении таким образом, что точка n подключения диода 9 соединяется с точкой k, а m – с точкой l.

Чтобы относительная погрешность результатов измерений не превышала 10 % при доверительной вероятности $0,9 \div 0,95$, проводилось по 5 измерений показаний манометров на каждом уровне установки расхода воды в трубопроводах стенда [15].

При проведении опытов при обратном токе воды диод устанавливался в соответствующее положение, а исходное положение кранов следующее: 2 – полностью открыт; остальные – закрыты. Перед пуском установки в работу производились измерения атмосферного давления, влажности воздуха и температуры окружающей среды. После подготовки установки к проведению экспериментов производился пуск насоса 2. Затем производилось плавное открытие крана 6, в соответствии с инструкцией по эксплуатации дифференциального манометра осуществлялась его продувка. После установления постоянства давления и расхода производилось считывание показаний приборов. Затем изменялся расход небольшим поворотом рукоятки крана и, после установления постоянства давления и уровней ртути в дифференциальном манометре, производилось считывание показаний приборов. После выполнения опытов при одном работающем насосе, производились опыты при параллельно подключенных насосах. В этом случае исходное положение кранов: 2, 3 – полностью открыты; остальные – закрыты. Вначале включается насос 2 как более мощный, затем насос 3, далее производится плавное открытие крана 6 до положения полного открытия. Показания приборов считываются после установления постоянства давления и расхода. Регулирование расхода осуществляется краном 6.

Для получения прямой расходной характеристики вихревого диода опыты проводились аналогично, только изменялось положение самого диода (точки подключения менялись местами).

Для исследований динамики процесса образования вихря стенд (рис. 2) был дополнительно снабжен датчиком давления типа «Сапфир 22 – ДИ» (рис. 3) на давление 6 кгс/см^2 . Монтаж его выполнен с учетом вибрации трубопровода при работе насоса и большой массы самого датчика, что в сочетании с тонкой стенкой трубы могло привести к нарушению целостности жесткого соединения. Исключить негативные последствия удалось с помощью гибкой трубки длиной 50 мм,

установленной между штуцером и датчиком. Кроме того, при монтаже датчика предусматривалось предварительное заполнение водой внутренних полостей трубки и датчика.



Рис. 5. Установка датчика давления типа «Сапфир 22 – ДИ»

Для записи показаний датчика во времени использовался аналого – цифровой преобразователь (АЦП) 1 (рис. 6) типа NI USB – 6008 серийный номер, сигнал с которого обрабатывался компьютером 2 с использованием программного комплекса LabVIEW. Тарировка датчика осуществлена с помощью грузопоршневого прессы МП – 6. В качестве эталонного использован образцовый манометр $p_y=10 \text{ кгс/см}^2$.

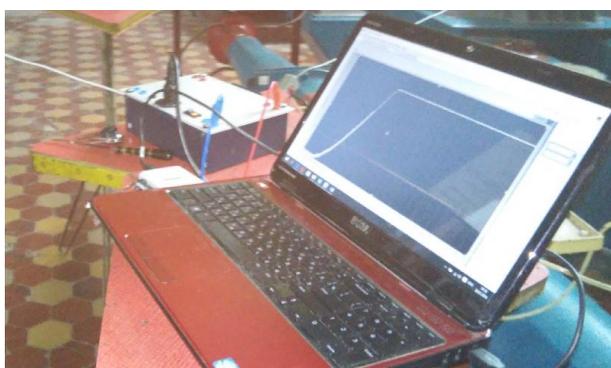


Рис. 6. Аппаратура, использованная при получении динамических характеристик вихревого диода

Для создания напора использовался насос 3 (рис. 7) типа 2 DK20, который включался при всех закрытых кранах, кроме крана 2, установленного на всасывающем трубопроводе.

Скачок расхода производился двумя способами:

1. При открытых кранах 4 и 5 производилось закрытие крана 5.

2. Открытием крана 4 при закрытом кране 5.

Открытие кранов производилось с помощью рычажно – грузовой механизма. Время открытия при этом $\Delta t=0,32 \text{ с}$ определено записью изменения тока

датчика на трубопроводе с установленным в выходном сечении насадком диаметром 19 мм (рис. 8).

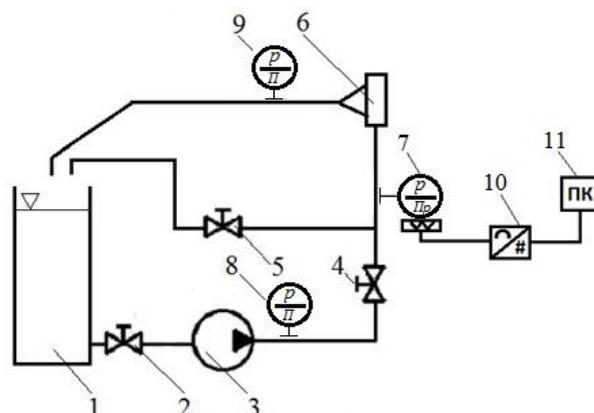


Рис. 7. Основные элементы стенда для исследования динамической характеристики вихревого диода: 1 – резервуар; 2, 4, 5 – краны; 3 – насос; 7 – датчик давления «Сапфир 22 – ДИ», 6 – вихревой диод; 8, 9 – контрольные манометры 10 – АЦП NI USB – 6008, 11 – ПК

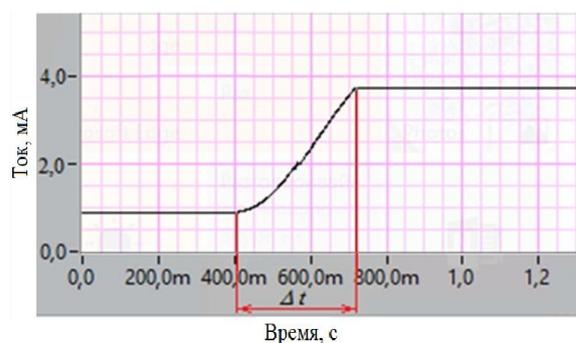


Рис. 8. Определение времени срабатывания крана

Испытания вихревого диода первым способом проведены в следующей последовательности: после пуска насоса открывались краны 4 и 5. Затем после выхода насоса на режим включалась запись процесса на компьютере, затем приводился в действие рычажно – грузовой механизм, который закрывал кран 5. Используются следующие настройки программы: по частоте процесса – до 1000 Гц, время записи процесса – 5 с. Далее насос отключался.

Вторым способом испытания проведены в следующей последовательности: после пуска насоса включалась запись процесса на компьютере, затем приводился в действие рычажно – грузовой механизм, который открывал кран 4.

5. Результаты эксперимента по определению диодности

В результате теоретических исследований были определены статические характеристики в диапазоне изменения диаметров $50 \leq d \leq 300 \text{ мм}$, шероховатости $0,01 \leq \delta \leq 1,00 \text{ мм}$, скорости потока $1 \leq v \leq 27 \text{ м/с}$ и статистическим методом получена степенная зависимость, устанавливающая связь между диодностью и названными параметрами

$$D = 2,42d_a^{0,369} \delta^{-0,0976} v^{0,0363}, \tag{2}$$

где D – диодность вихревого диода; δ – высота шероховатость стенок, мм; v – скорость течения жидкости, м/с; d – условный диаметр подводящего патрубка вихревого диода, мм.

При этом доверительная вероятность составляет 95 %, максимальная ошибка не превышает 11 %.

Кроме того, исследована постоянная времени вихревого диода как выход во времени на максимальное сопротивление.

$$T = 70 \frac{d}{v} + 0,92\Delta t + 0,112, \tag{3}$$

где T – постоянная времени вихревого диода, с; Δt – время увеличения скорости потока до максимального значения, с.

Уравнение (3) получено для следующих диапазонов параметров $0,05 \leq d \leq 0,3$ м, $1 \leq v \leq 27$ м/с, $0,05 \leq \Delta t \leq 2$ с и использовано для учета динамических свойств диода в алгоритме программы [16], моделирующей гидравлический удар с установленными на трубопроводе вихревыми диодами.

Результатом эксперимента является получения расходных характеристик вихревого диода (рис. 9, 10).

По результатам эксперимента (рис. 9, 10) методом наименьших квадратов получены уравнения регрессии при обратном токе жидкости (4) и при прямом токе (5), адекватность которых подтверждена при помощи критерия Фишера.

$$\Delta p_{обр} = -0,0358Q^3 + 2,18Q^2 - 37,04Q + 218,8, \tag{4}$$

$$\Delta p_{пр} = -0,0041Q^2 + 0,4252Q + 0,0771. \tag{5}$$

Параметр диодности (рис. 11) рассчитан делением уравнения (4) на (5) (кривая 1), а кривая 2 получена в результате моделирования рабочего процесса вихревого диода. Максимальная диодность для экспериментального диода составила 12, что соответствует с точностью 5 % расчетному значению, полученному при моделировании для шероховатости внутренней поверхности 1 мм.

В результате исследования динамических характеристик вихревого диода получены графики изменения давления от времени для первого (рис. 12) и второго (рис. 13) способа получения скачка расхода.

При этом время выхода на рабочий режим составляет в первом случае 1,15 с и 1,35 с во втором случае.

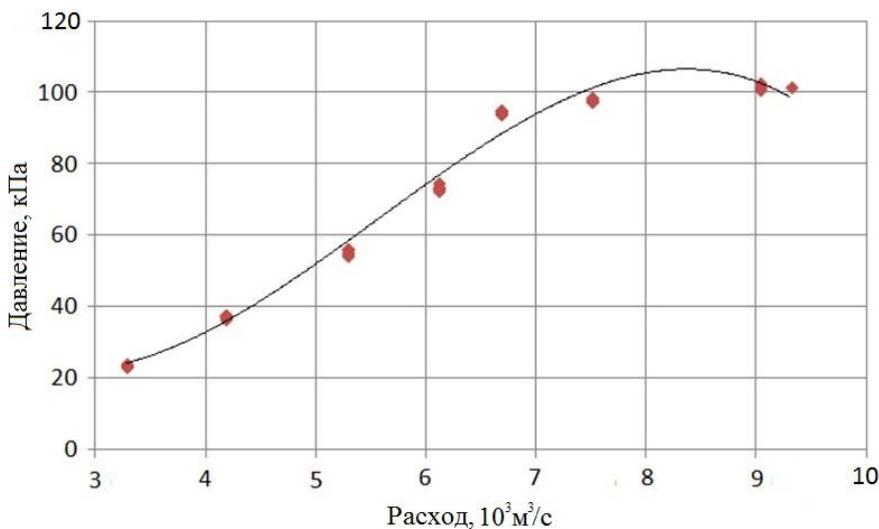


Рис. 9. Расходная характеристика вихревого диода при обратном токе жидкости

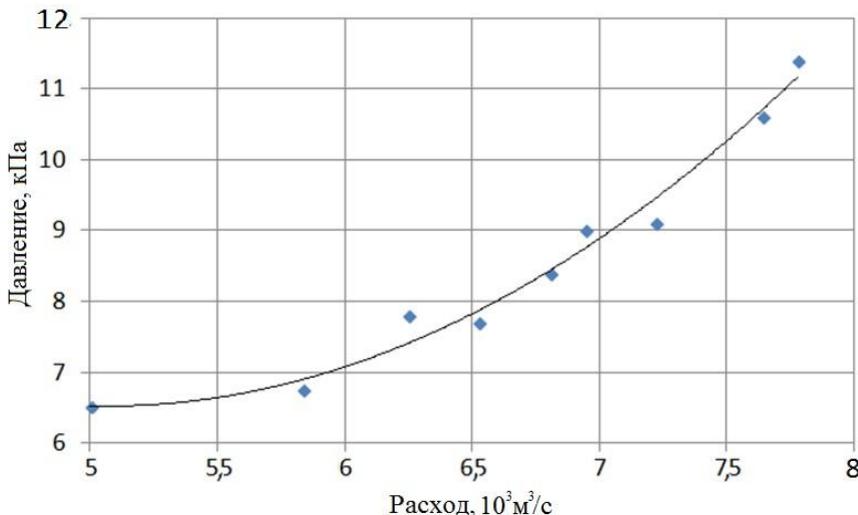


Рис. 10. Расходная характеристика вихревого диода при прямом токе жидкости

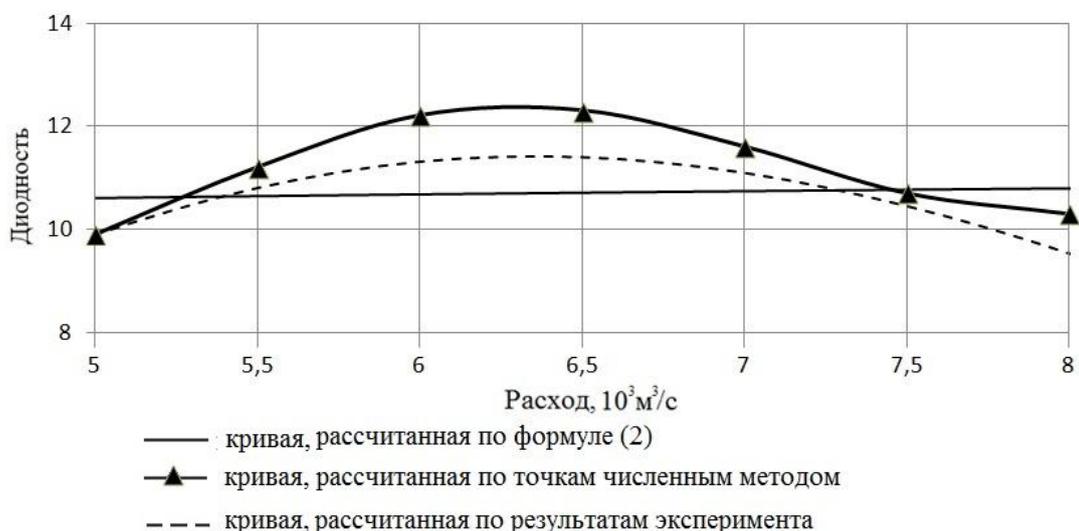


Рис. 11. Зависимость диодности D от скорости потока v : 1 — эксперимент, 2 — расчет

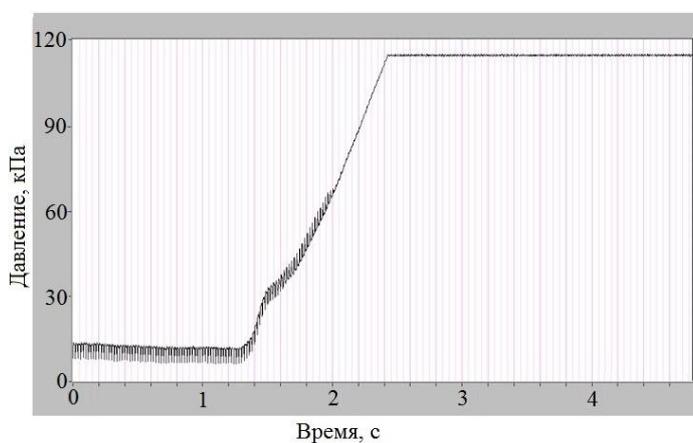


Рис. 12. Графики изменения давления во времени первым способом

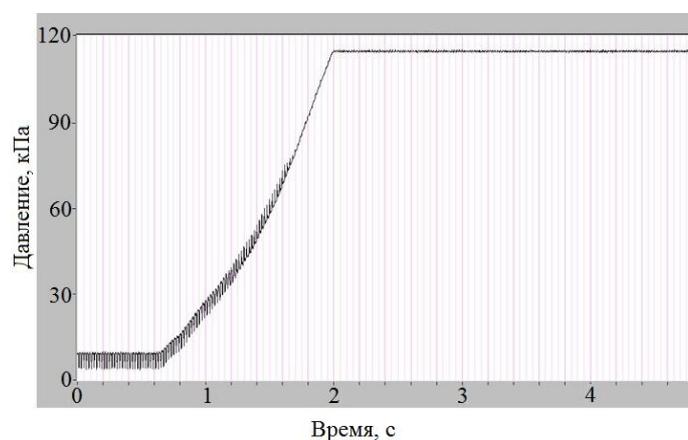


Рис. 13. График изменения давления во времени вторым способом

6. Обсуждение результатов эксперимента по определению диодности вихревого диода

Математическая модель, принятая для численного моделирования, может быть применена при исследовании рабочего процесса вихревого диода. Максимальная диодность составляет 12 и соответствует скорости движения воды 3,9 м/с при данных геометрических раз-

мерах и шероховатости 1 мм. При этом последняя величина включает в себя как высоту микронеровностей, так и определенные изменения формы диода, такие как: цилиндричность вихревой камеры, соосность конических и цилиндрических поверхностей, неточности сопряжений, связанные с термическими процессами при сварочных работах в процессе изготовления. В эксперименте [11] достигнута диодность вихревого диода 10 при этом очевидно некоторое нарушение форм и сопряжений. В связи со сказанным выше целесообразно провести эксперимент с моделями вихревых диодов, имеющих меньшую шероховатость, а также исследовать более широкий диапазон изменения скоростей.

Полученные результаты подтвердили адекватность принятой математической модели, которую можно использовать для исследования рабочих процессов в вихревом диоде, вихревых насосах и в системах струйной автоматки. В целом полученные результаты соответствуют с различной степенью точности исследованиям, выполненным ранее, и подтверждают высокое гидравлическое сопротивление, создаваемое вихревым диодом при обратном токе жидкости.

Анализ динамики изменения давления показывает, что время достижения максимального давления на входе в вихревой диод 115 кПа, а значит, и максимального гидравлического сопротивления, составляет в первом случае 1,15 с, во втором – 1,35 с. При этом скорость воды в трубопроводе определена по расходной характеристике диода (рис. 8) $v=3,54$ м/с.

В соответствии с формулой (3) для данных условий имеем постоянную времени $T=1,39$ с. Таким образом, во втором случае отклонение расчетного времени от полученного опытным путем времени выхода на режим составляет менее 3 %. При первом способе получения скачка расхода, в момент закрытия крана 5 определенный расход через вихревой диод уже существовал, что соответствующим образом уменьшило время выхода на рабочий режим и увеличило отклонение до 17 %. Таким образом, постоянная времени вихревого диода

сопоставима по времени с фазой гидравлического удара, которая при длине трубопровода 600 м составляет время порядка 1 с.

7. Выводы

1. Экспериментально получены статические характеристики вихревого диода, отличающиеся от расчётных до 5 % в зоне максимальной диодности вихревого диода. Получена максимальная диодность 12, которая соответствует расчётной. Это позволило с приемлемой точностью подтвердить адекватность теоретической математической модели рабочего процесса вихревого диода, которая может быть использована для определения конструктивных и рабочих параметров широ-

кой гаммы вихревых диодов для гашения гидравлических ударов в трубопроводах.

2. Динамические свойства диода соответствуют определенным теоретически, отклонение по постоянному времени составляет 3 %. Экспериментальным путем доказана возможность использования вихревого диода в качестве средства предотвращения гидравлических ударов путем сопоставления времени формирования вихря (постоянной времени вихревого диода) с фазой переходного процесса в трубопроводе.

3. Существенное влияние на величину диодности оказывает величина шероховатости внутренних поверхностей. Для повышения точности моделирования рабочего процесса вихревого диода целесообразно исследовать процесс движения вихревого потока в пристеночной области.

Литература

1. Seeber, G. Das Wasserschloss des Kaunertalkraftwerkes der TIWAG: ein neuer Typ eines rickstromgedrosselten Kammerwasserschlosses [Text] / G. Seeber // Sonderdruck. – 1970. – Vol. 88. – P. 1–8.
2. Naakh, F Vortex chamber diodes as throttle devices in pipe system. Computation of transient flow [Text] / F. Naakh // Journal of Hydraulic research. – 2003. – Vol. 41, Issue 1. – P. 53–59. doi: 10.1080/00221680309499928
3. Оверко, В. М. Защита от гидравлических ударов водоотливных установок с погружными насосами [Текст] / В. М. Оверко, В. П. Овсянников, О. Ф. Папаяни // Разработка рудных месторождений науч. Техн. Сб. Криворожский технический университет. – 2006. – Вып. 1 (90). – С. 158–162.
4. Гимадиев, А. Г. Исследование характеристик вихревого гидравлического дросселя для систем подготовки проб теплоносителя [Текст] / А. Г. Гимадиев, А. В. Уткин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2015. – № 4. – С. 110–117.
5. Lv, Q. Design, Testing and Modeling of the Direct Reactor Auxiliary Cooling System for AHTRs [Text] / Q. Lv, X. Sun, R. Chtistensen, T. Blue, G. Yoder, D. Wilson. – Office of the Assistant Secretary for Nuclear Energy. – Oak Ridge, US, 2015. – 169 p. doi: 10.2172/1183704 – Available at: <https://neup.inl.gov/SiteAssets/Final%20%20Reports/FY%202010/10-951%20NEUP%20Final%20Report.pdf>
6. Mathai, J. P. A study of vortex diodes at low Reynolds number [Text] / J. P. Mathai. – Electronic Theses and Dissertations. – Windsor, Ontario, Canada, 1992. – 88 p. – Available at: <http://scholar.uwindsor.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1825&context=etd>
7. Baker, P. J. A comparison of fluid diodes [Text] / P. J. Baker // In Proceedings of the 2nd Cranfield Fluidics Conference, 1967. – P. 88–126.
8. Лебедев, И. В. Элементы струйной автоматики: научное издание [Текст] / И. В. Лебедев, С. Л. Трескунов, В. С. Яковенко. – Москва: Машиностроение, 1973. – 359 с.
9. Burnett, R. Fluidic Diode Development and Optimization [Text] / R. Burnett, D. Caso, J. Tang. – Berkeley, USA, 2010. – 36 p.
10. Yoder, J. Vortex Diode Analysis and Testing for Fluoride Salt-Cooled High-Temperature Reactors [Text] / J. Yoder, L. Graydon, Y. Elkassabgi, G. De Leon, et. al. – ORNL. – 2011. – 28 p.
11. Kulkarni, A. Pressure Drop Across Vortex Diodes: Experiments and Design Guidelines [Text] / A. Kulkarni, V. V. Ranade, R. Rajeev, S. B. Koganti // Chemical Engineering Science. – 2009. – Vol. 64, Issue 6. – P. 1285–1292. doi: 10.1016/j.ces.2008.10.060
12. Пат. Україна, № UA 75770, МПК F1 6 L 55/04. Струменевий діод [Текст] / Кононенко А. П., Оверко В. М., Оверко М. В., Гончаров А. М. – заявлено 12.06.12; опубл. 10.12.12, Бюл. № 23. – 4 с.
13. Молчанов, А. М. Математическое моделирование задач газодинамики и тепломассообмена [Текст] / А. М. Молчанов. – Москва: Изд-во МАИ, 2013. – 206 с.
14. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 320 с.
15. Тимошенко, Г. М. Теория инженерного эксперимента: Учебное пособие [Текст] / Г. М. Тимошенко, П. Ф. Зима. – К.: УМК ВО, 1991. – 124 с.
16. Кононенко, А. П. Выбор основных параметров вихревого диода для предотвращения гидравлических ударов в вертикальных трубопроводах [Текст] / А. П. Кононенко, В. П. Овсянников, М. В. Оверко // Вестник Национального технического университета ХПИ. Серия Математическое моделирование в технике и технологиях. – 2015. – № 6 (1115). – С. 40–49.