

0

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

Оверко Михайло Валентинович

УДК 621.646.943

**ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧИХ
ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ
ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ ВОДОНАПІРНИХ УСТАНОВОК
ВІД ГІДРАВЛІЧНИХ УДАРІВ**

Спеціальність 05.05.17 - гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми - 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
ВІРИЧ Світлана Олександрівна,
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»,
завідувач кафедри гірничих машин та мехатронних
систем машинобудування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
АНДРЕНКО Павло Миколайович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри гідропневмоавтоматики і
гідроприводу;

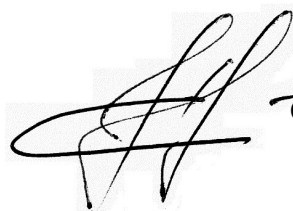
кандидат технічних наук, доцент
КУЛІНІЧ Сергій Павлович
Сумський державний університет,
доцент кафедри прикладної гідроаеромеханіки.

Захист відбудеться «7» жовтня 2016 р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К55.051.03 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2 , корп. А, ауд. 213.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розісланий «6» вересня 2016р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради К55.051.03
кандидат технічних наук, доцент



Є.М. Савченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Несанкціоноване відключення або позаштатне включення насосів напірних гідросистем, некоректне маневрування трубопроводною запірно-регулюючою арматурою, аварійне спрацьовування відсічних клапанів тощо, тобто відносно швидка зміна швидкості потоку краплинної рідини може приводити до виникнення в таких системах гідравлічних ударів - періодичних підвищень тиску, що характеризуються насамперед амплітудою й частотою коливань. У результаті гідравлічних ударів спостерігаються пориви трубопроводів і розгерметизація з'єднань, які можуть викликати вторинні аварії або травми обслуговуючого персоналу. Крім того, трапляються виходи з ладу елементів насоса, поломки запірно-регулюючої апаратури, вигини трубопроводів, порушення елементів кріплення.

У промисловості в основному використовуються наступні засоби захисту від небезпечних коливань тиску: пневмогідравлічні акумулятори, гасителі гідравлічних ударів, що працюють за принципом скидання частини середовища, що транспортується, і зрівняльні резервуари. Застосування зазначених засобів захисту супроводжується значними матеріальними витратами й не завжди гарантує надійний захист від гідравлічних ударів.

Знизити матеріальні витрати й підвищити ефективність захисту від гідравлічних ударів можливо за допомогою використання перспективних засобів: струминних діодів, що забезпечують збільшення зворотного гідравлічного опору трубопроводу, що має значну висоту нагнітання (у якому більше 90% напору витрачається на підйом води), або спеціальним з'єднанням основного й резервного трубопроводів для установок, де передбачені такі трубопроводи (наприклад, шахтні водовідливні установки).

Таким чином, обґрунтування раціональних параметрів робочих процесів і областей застосування перспективних засобів захисту від гідравлічних ударів є актуальною науково-практичною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри енергомеханічних систем Донецького національного технічного університету. Здобувач був виконавцем госпбюджетної теми «Дослідити та розробити рекомендації щодо впровадження заходів захисту головної водовідливної установки горизонту 805 м блока №10 ш/у «Покровське», що виконувалася в 2012 – 13 роках за договором із ПрАТ «Донецьксталь - металургійний завод» № 12-65 від 17.05.2012г. і науково-дослідної держбюджетної теми № Н25-10 «Обґрунтування параметрів схем і засобів гідравлічного руйнування твердих масивів та транспортування гідросумішей (рідин) з метою підвищення технічних показників» (2012 – 2014 рр.).

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є мінімізація матеріальних витрат на ефективний захист водонапірних установок від небезпечних підвищень тиску рідин, що перекачуються, шляхом обґрунтування раціональних параметрів робочих процесів і визначення областей застосування перспективних засобів захисту від гідравлічних ударів.

Завдання досліджень:

- на основі аналізу апріорної інформації встановити можливість мінімізації матеріальних витрат на ефективний захист водонапірних установок від руйнівних тисків рідин, що перекачуються, при використанні перспективних засобів зниження амплітуди гідравлічних ударів – таких, що забезпечують підвищений зворотний опір трубопроводів, та резервного напірного трубопроводу насосної установки;

- обґрунтувати раціональне місце розташування на напірному трубопроводі насосної установки засобу захисту від гідравлічних ударів з підвищеним зворотним опором;

- розробити фізичну й математичну моделі робочих процесів засобів захисту водонапірних установок від гідравлічних ударів із забезпеченням підвищеного зворотного опору напірного тракту за допомогою гідравлічних і струминних діодів, а також із використанням резервного напірного трубопроводу насосної установки;

- за допомогою розроблених математичних моделей робочих процесів перспективних засобів захисту водонапірних установок від гідравлічних ударів встановити взаємозв'язок між їх технологічними й конструктивними параметрами, визначити області ефективного застосування;

- провести експериментальні дослідження роботи вихрового діода у складі насосної установки з метою підтвердження правомірності його застосування для ефективного гасіння гідравлічних ударів і доведення адекватності розробленої математичної моделі робочого процесу вихрового діода робочому процесу натурного зразка;

- розробити методики та рекомендації з проектування й встановлення ефективних областей застосування перспективних засобів захисту водонапірних установок від гідравлічних ударів;

- забезпечити використання результатів дисертаційних досліджень у промисловості й навчальному процесі технічної вищої школи, а також запропонувати напрямки подальшого вдосконалювання засобів захисту водонапірних установок від гідравлічних ударів.

Об'єкт дослідження – робочий процес перспективних засобів захисту водонапірних установок від гідравлічних ударів із забезпеченням підвищеного зворотного опору напірного трубопроводу та із використанням резервного вертикального напірного трубопроводу насосної установки.

Предмет дослідження – характеристики та параметри робочих процесів перспективних пристроїв захисту водонапірних установок від гідравлічних ударів: діодність, прямий гідравлічний опір, максимальний тиск рідини, що перекачується.

Методи досліджень. Системний аналіз апріорної інформації, який дозволив визначити можливість застосування пристроїв, виконаних на базі струминного діода для керування гідродинамічними процесами в напірному трубопроводі. Метод графоаналітичного дослідження перехідних процесів (метод Л. Бержерона), що відрізняється високою інформативністю. Метод математичного моделювання з використанням законів механіки рідини, законів збереження, основних положень гідравліки із застосуванням програмних комплексів ANSYS і Matlab, що дозволило визначити області раціональних значень параметрів внутрішніх каналів струминного діода, досягти максимальної діодності в рамках установлених вимог і досліджувати перехідний процес у трубопроводі. Експериментальні дослідження проводилися із застосуванням теорії планування експерименту й математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Розроблена математична модель робочого процесу струминного діода, як засобу захисту від гідравлічного удару, що дозволяє визначити його діодність залежно від форми й геометричних параметрів пристрою, швидкості течії і шорсткості внутрішніх поверхонь вихрового діода.
2. Уточнена математична модель робочого перехідного процесу в трубопроводах водонапірних установок, яка враховує змінний гідравлічний опір, що до-

зволило встановити потрібні технологічні й геометричні параметри вихрового діода, як засобу захисту від гідравлічних ударів.

3. Уперше аналітично доведена можливість і встановлені умови ефективного захисту гідросистеми від небезпечних тисків при розташуванні гідравлічного діода поблизу кінцевого перетину напірного трубопроводу.
4. Уперше розроблена математична модель робочого перехідного процесу в напірних гідросистемах, обладнаних резервним трубопроводом, що дозволяє визначити раціональні параметри перепускної трубки, що забезпечує ефективний захист системи від гідравлічного удару.

Практичне значення:

1. Розроблені спосіб і конструкції гідравлічних і струминних діодів, а також схеми насосних установок (патенти України на корисну модель №№ 68287, 75770, 79188, 88736, 89206, 89287, 89315, 90045, 97743 [8-17] та патент на винахід 110208 [18]), що дозволяють забезпечувати ефективний захист напірних трубопроводів від гідравлічних ударів.
2. Розроблені методики визначення раціональних областей застосування й параметрів гідравлічних і струминних , як засобів захисту напірних трубопроводів насосних установок від гідравлічних ударів.
3. Розроблена методика визначення параметрів перепускної лінії для водонапірної гідросистеми з резервним трубопроводом, що дозволяє знизити величину гідравлічного удару.
4. Результати досліджень використовуються ПАО «ДОНДПРОШАХТ» при проектуванні водовідливних установок на шахті «Покровська»; ПАТ НПО «Нумес» при розробці заходів щодо захисту від гідравлічних ударів на шахтних водовідливних установках із занурювальними заглибними насосами.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно.

У роботі [1] запропонована схема підключення перепускного трубопроводу, виконаний аналіз впливу його опору на динамічні процеси в паралельно з'єднаних трубопроводах водовідливної установки. У роботі [2] здобувачем проведений аналіз і показана ефективність способу захисту трубопроводу від гідравлічного удару шляхом програмного введення додаткового опору. У роботі [3] здобувачем розроблена методика врахування основних інерційних властивостей вихрового діода, що дозволяє в базовому програмному комплексі уточнити модель перехідного процесу в напірному трубопроводі. У роботі [4] здобувач запропонував алгоритм приведення схеми водовідливної установки з паралельно з'єднаними трубопроводами до схеми з одним робочим і одним резервним трубопроводом. У роботі [5] запропонований алгоритм розрахунків робочого процесу гідроімпульсатора зі струминним діодом на ударному трубопроводі. У роботі [6] здобувач запропонував критерій ефективності для вибору параметрів засобів захисту трубопроводів від гідравлічних ударів. Крім того, в роботі [7] здобувач самостійно провів експериментальні дослідження вихрового діода і проаналізував отримані результати.

Апробація результатів роботи. Основні положення дисертації доповідалися, обговорювалися й одержали схвалення на: XIII, XIV Міжнародних науково-технічних конференціях АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Чернігів, 2012 р., м. Одеса, 2013 р.), XVII, XIX, XX Міжнародних науково-технічних конференціях «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (м. Київ, 2013р., 2015 м. Кіровоград, 2014р.),

Міжнародній конференції «Вітчизняна та зарубіжна наука на початку другої декади XXI Століття» (м. Київ, 2015р.).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи відображені в 7 статтях, опублікованих у фахових спеціалізованих виданнях, що входять до переліку, затвердженого МОН України (три з них входять до наукометричних баз даних, зокрема, одна – до SCOPUS), отримано 10 патентів України на корисну модель та 1 патент на винахід, а також опубліковано 6 тез доповідей на науково-технічних конференціях.

Структура й обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів, висновку і додатків. Загальний обсяг роботи складає 192 сторінки, у тому числі 160 сторінок основного машинописного тексту, 105 рисунків, 8 таблиць, 5 додатків на 32 сторінках і списку літератури з 113 найменувань на 12 сторінках

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подана загальна характеристика роботи, показана актуальність обраної теми дисертації, сформульовані мета й завдання досліджень, подано відомості про наукову новизну й практичну цінність отриманих результатів.

У першому розділі проведений аналіз літературних джерел щодо встановлення причин і наслідків гідравлічних ударів у системах, в яких понад 90% створюваного напору витрачається на подолання геометричної висоти нагнітання, а гідравлічні удари виникають при раптовому відключенні насосного агрегату, які є найбільш частою причиною їх руйнувань (67%). Відзначається, що на деяких водонапірних установках застосування засобів захисту внесене до правил безпеки і є обов'язковим.

З аналізу існуючих методів моделювання гідравлічних ударів встановлено, що в основі їх є математичний опис течії в'язкої ізотропної однорідної рідини, що стискається, в напірному трубопроводі з використанням фундаментальних законів збереження: рівняння руху Нав'є-Стокса, рівняння нерозривності й закону Гука. Ці рівняння зі звичайними для теорії гідравлічного удару допущеннями приводяться до системи, що складається із двох рівнянь – руху й нерозривності:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} - k, ; \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{-c^2}{g} \frac{\partial u}{\partial x},$$

де $H \equiv H(x,t)$ –гідрометричний напір за довжиною трубопроводу; x – координата в межах трубопроводу; $0 \dots L_t$, L_t – довжина трубопроводу; $u \equiv u(x,t)$ – швидкість потоку по довжині трубопроводу; g – прискорення вільного падіння; t – час; $k \equiv k(x)$ – синус кута нахилу трубопроводу до горизонту; c – швидкість поширення ударної хвилі в трубопроводі.

Дана система рівнянь містить незалежні функції $H(x,t)$ і $u(x,t)$, визначення яких і становить основне завдання при моделюванні гідравлічного удару. А завдання створення засобів захисту трубопроводів від гідравлічних ударів, по суті, зводиться до зміни цих функцій за допомогою технічних пристроїв.

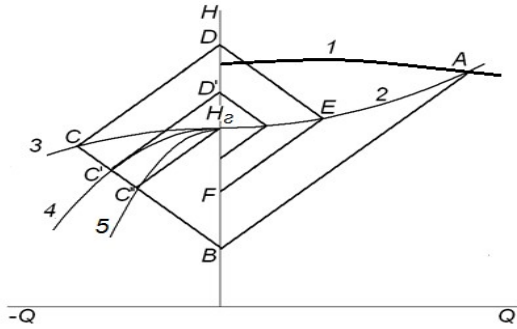


Рисунок 1 – Графічний аналіз гідралічного удару при різному опорі зворотного току рідини: 1 – напірна характеристика насоса, 2, 3 – витратні характеристики трубопроводу при прямому і зворотному русі рідини, відповідно; 4, 5 – характеристики трубопроводу при збільшеному зворотному опорі; прямі AB, BC, CD, C'D' та ін. – хвильові характеристики трубопроводу.

повним і закінченим можна вважати метод Луї Бержерона. Вцілому, квінтесенція графічного методу розрахунків полягає в послідовному з'єднанні ліній, що позначають характеристики граничних умов на кінцях ділянки трубопроводу, що розглядається. За допомогою цього методу можна легко оцінити вплив збільшення зворотного опорі напірного трубопроводу на величину гідралічного удару (рис.1).

Зі збільшенням опорі зворотного току, наприклад, до значення кривою 4, величина підвищення напіру при гідралічному ударі зменшується (з величини H_D до значення $H_{D'}$). У випадку подальшого збільшення опорі (крива 5) підвищення немає зовсім, а перехідний процес в ідеальному випадку через час, рівний фазі гідралічного удару, припиняється.

Розглянуті чисельні методи інтегрування диференційних рівнянь, що описують гідралічний удар, і обґрунтоване застосування методу характеристик. Запропонована класифікація існуючих способів і засобів захисту водонапірних систем від гідралічних ударів, що виникають при раптовій зупинці насоса. У результаті їх аналізу показані переваги струминних діодів, які не мають рухомих елементів, а отже є високо надійними.

Визначені мета, завдання й методи досліджень.

У другому розділі визначено найбільш ефективні місця розташування (локалізація) засобів створення підвищеного зворотного опорі й способи підвищення зворотного опорі, що базуються на застосуванні різного типу пристроїв – гідралічних, струминних і гібридних діодах. Під гідралічним діодом розуміємо пристрій з рухомим механічним елементом, що має різний гідралічний опір при прямому й зворотному русі рідини, струминні діоди не мають рухомих елементів. Розглянуто фізичні особливості протікання перехідного процесу в трубопроводі зі збільшеним зворотним опорі. Встановлено, що хвильовий процес супроводжується переносами значних мас води і підвищений гідралічний опір забезпечує підвищене розсіюванні енергії.

Для розв'язання завдань, пов'язаних зі зміною опорі трубопроводу при зворотному русі води, базова математична модель, яка припускала розподіл напірного трубопроводу на п'ять ділянок, доповнена наступними граничними умовами:

Графоаналітичний метод аналізу перехідних процесів є найбільш інформативним, гнучким і швидким (при попередній, якісній оцінці рішення), ніж будь-який інший метод, хоча, безумовно, програє в точності розв'язання завдання чисельним методам (рис.1). Передумовою цього методу дослідження гідралічного удару вважається можливість представлення в одній системі координат витрата – напір більшості рівнянь, які використовуються при розрахунках параметрів перехідного процесу. Це, зокрема, напірна характеристика насоса, рівняння трубопроводу, рівняння гідралічного удару (М.Є.Жуковського), характеристики затворів, клапанів і т.ін. У результаті аналізу даних методів було розроблено кілька способів графічного розв'язання рівняння гідралічного удару, з яких найбільш

$$\begin{cases} a_j = a_{jрасч}, \text{ якщо } Q \geq 0 \\ a_j = a_{jрасч} D, \text{ якщо } Q < 0 \end{cases}$$

де a_j – гідравлічний опір j -тієї ділянки; $a_{jрасч}$ – розрахунковий гідравлічний опір j -тієї ділянки; D – коефіцієнт підвищення опору – діодність – відношення зворотного гідравлічного опору $a_{обр}$ до прямого $a_{пр}$, тобто $D = a_{обр} / a_{пр}$.

Моделювання робочого процесу проводилося на базі параметрів водовідливної установки горизонту 805 м блоку № 10 ш/у «Покровське», які відповідають області передбачуваного використання, на якій можливе застосування розроблених засобів захисту і які підтвердили ефективність даного методу (рис.2)

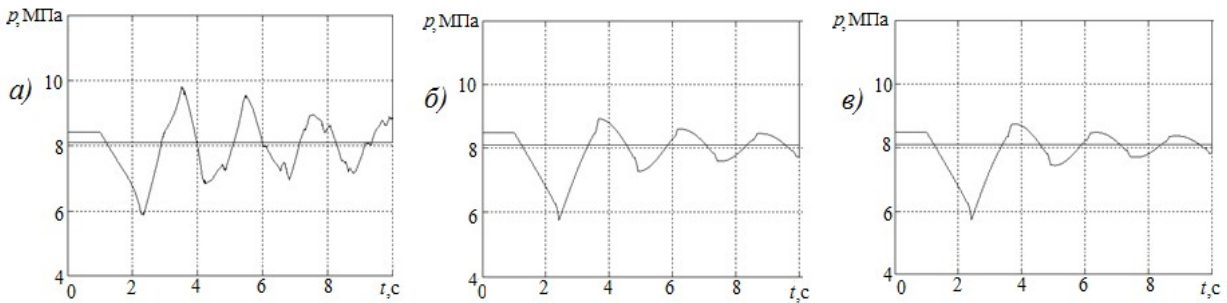


Рисунок 2 –Перехідний процес в початковому перетині нагнітального трубопроводу при $D = 1$ - а), $D = 30$ - б), $D = 40$ - в)

Встановлено, що з підвищенням діодності величина гідравлічного удару знижується, що ділянки трубопроводу з підвищеним зворотним опором, розташовані на різному віддаленні від зворотного клапана, по-різному впливають на величину гідравлічного удару, причому найбільший вплив має ділянка, розташована поблизу вихідного перетину (1/8 частина вертикального трубопроводу). Доведено, що горизонтальна ділянка на поверхні не має істотного впливу на перехідний процес. Момент інерції ротора насосного агрегату в цьому випадку так само не знижує помітно амплітуду коливань тиску.

Проаналізовані гідравлічні діоди, в яких для підтримки в процесі експлуатації заданих властивостей використані чистильники (рис. 3а-г).

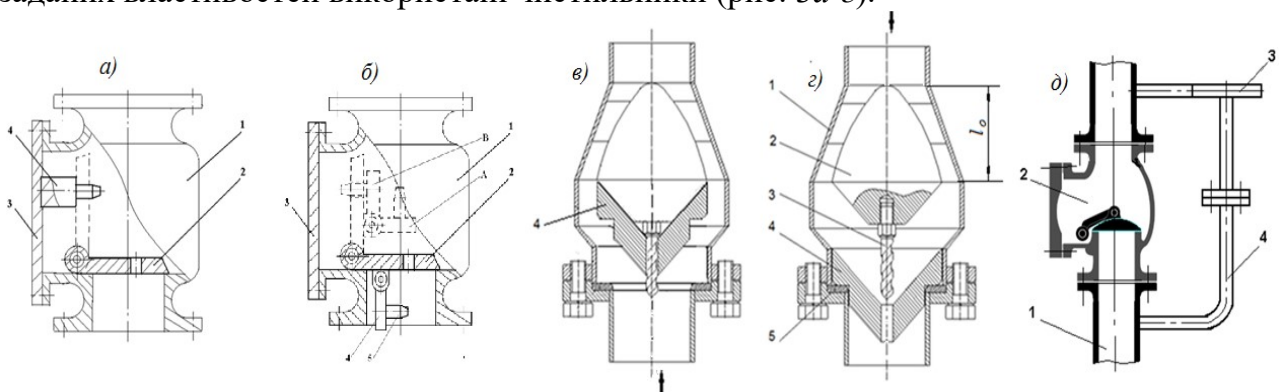


Рисунок 3 – Гідравлічні діоди: а) – із чистильником; б) – з рухливим чистильником; в), г) – безшарнірний з обтічником; д) – з байпасом

Загальний недолік даних пристроїв – малі прохідні перетини й можливість «прилипання» поверхонь. Дослідження показали, що застосування одного вихрового діода 3 (рис. 3д) на байпасній трубці дозволяє збільшити її діаметр приблизно в 1,5 рази.

Вільними від зазначених недоліків є струминні діоди, зокрема, вихрові, що мають кращі діодні властивості. Сформульовані вимоги до ефективного вихрового діода. Параметричні вимоги: максимальна діодність (впливає із проведених досліджень); мінімальний гідравлічний опір при прямому русі рідини, що необхідно для мінімізації гідравлічних втрат від установки вихрового діода в напірному трубопроводі насосної установки при її роботі в сталому режимі. Технологічні вимоги: максимальна простота у виготовленні - обумовлено питанням мінімізації матеріальних витрат і можливістю його виготовлення в умовах, наприклад, механічних майстерень підприємства; обмежений розмір у плані - пояснюється ця вимога площею перетину шахт або каналів, де прокладаються трубопроводи; максимальний прохідний перетин - впливає з можливого засмічення прохідного перетину різними твердими включеннями.

На основі цих вимог створена схема вихрового діода з конічним входом у вихрову камеру й відводом, виконаним на торцевій поверхні камери (рис. 4).

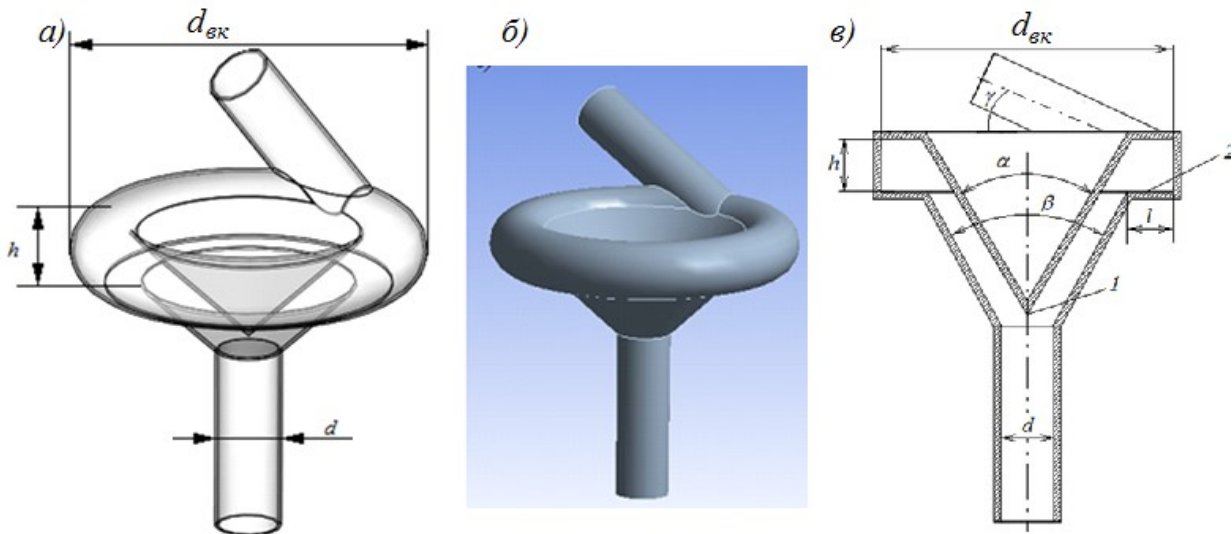


Рисунок 4 – Вихровий діод: а) - тривимірна модель, б) - модель проточної частини, в) – схема діода після проведених досліджень

Для проведення теоретичних досліджень, з метою визначення ефективності роботи діодів, як засобу захисту від гідравлічних ударів, був обраний метод моделювання за допомогою універсальної програмної системи кінцево-елементного аналізу, яка має широке застосування в сфері автоматизованих інженерних і наукових розрахунків Ansys CFX.

Зазначена програма для дискретизації області моделювання використовує сітку кінцевих елементів (числові значення у вузлах сітки). У підсумку формуються рівняння для кінцевих об'ємів, які зберігають поточні значення потоку рідини, що є необхідною умовою для точного розв'язання завдань гідродинаміки.

Моделювання робочого процесу здійснюється на основі чисельного розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса, осереднені по Рейнольдсу (RANS)

$$\rho \frac{\partial \overline{u_j u_i}}{\partial x_j} = \rho \overline{f} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\overline{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i' u_j'} \right],$$

де рискою зверху відзначені змінні складові, осереднені за часом, а пульсаційні складові – апострофом; ρ – густина; μ - динамічна в'язкість. Ліва частина рівняння $\rho \frac{\partial \overline{u_j u_i}}{\partial x_j}$ описує зміни кількості руху рідкого об'єму через зміну в часі осередненої складової

швидкості, а права частина компенсує зміни осередненими зовнішніми силами $\rho \bar{f}_i$, осередненими силами тиску $-\bar{p}\delta_{ij}$, й силами в'язкості $\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$. Сюди ж входять так звані напруги Рейнольдса (турбулентні напруги) $(-\rho \overline{u'_i u'_j})$, що враховують додаткові втрати й перерозподіл енергії в турбулентному потоці. Для замикання системи рівнянь Рейнольдса обрано модель турбулентності SST (Shear Stress Transport) або модель зсувних напружень. Дана модель є комбінованою моделлю двох моделей турбулентності, заснована на використанні k - ω моделі у пристінкових областях і k - ε - в областях, що перебувають на достатньому віддаленні від стінки.

У якості умов однозначності для системи рівнянь задаються наступні умови: вода як робоча рідина, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; кінематична в'язкість $\nu = 1,006 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; температура рідини $T_a = 20^\circ \text{ C}$; швидкість потоку на вході в розрахункову область $v_{\text{вх}} = v_I$; тиск на виході з розрахункової області $p_{\text{вих}} = p_a = 101325 \text{ Па}$; швидкість потоку біля всіх бічних поверхонь $v_{\text{см}} = 0$.

Для підтвердження адекватності прийнятої математичної моделі використані експериментальні дані, отримані дослідниками НАСА, і опубліковані в 2011 р. Відхилення по точках експерименту становлять 3,5 ... 10,7%.

Для пошуку раціональної форми діода розрахунки течій проводилися в сталому режимі. У якості робочого середовища прийнята рідина, яка не стискається. Допущення при моделюванні: потік на вході в розрахункову область вісесиметричний, відсутні витоки, режим теплового стану ізотермічний. Побудовані тривимірні моделі (рис. 4,а) вихрового діода й його проточної частини (рис. 4,б). Тетрагональна сіткова модель проточної частини, складалася з 200 тисяч елементів при прямому русі рідини й 1200 – при зворотному. Після генерації сіток були задані наступні граничні умови для прямого й зворотного руху рідини: швидкість на вході 3 м/с, тиск на виході 101350 Па, шорсткість стінок $\delta_{\text{см}} = 0,01 \text{ мм}$. Критерій ефективності – діодність – основний параметр, що визначає якість вихрового діода, як засобу захисту від гідравлічних ударів. Проаналізовано вплив на діодність наступних факторів, що визначають форму вихрового діода (рис. 4,в): зовнішній β (рис. 5,б) і внутрішній α (рис. 5,а) кути нахилу конусної камери, нижня кільцева планка вихрової камери, її розташування й розміри, форма вихрової камери (тороїдальна, циліндрична), форма вершини конуса і горла патрубків, що підводять (рис. 5,г), кут виходу патрубків, що відводять γ (рис. 5,в).

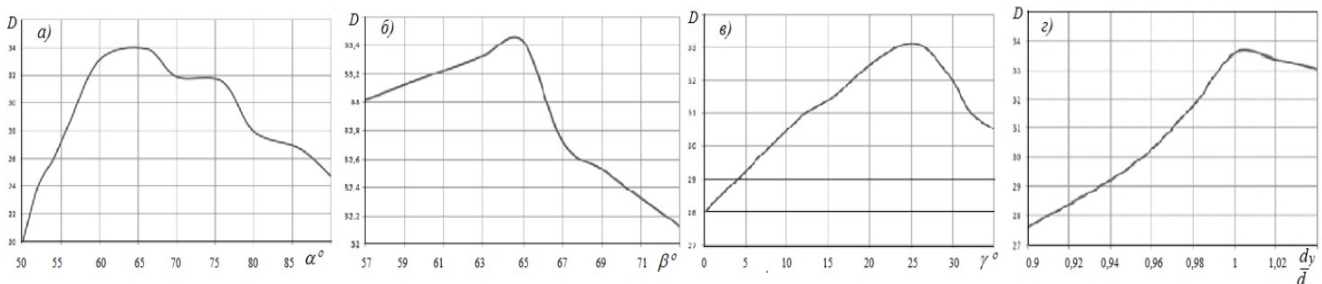


Рисунок 5 – Залежності діодності від визначальних факторів

На підставі синтезованої таким чином конструкції вихрового діода була побудована графічна модель, для якої розраховані статичні характеристики в діапазоні зміни параметрів: d – діаметр патрубків, що підводять та відводять 50 ... 300 мм; швидкість води v в інтервалі 1 ... 6 м/с однакова в прямому й зворотному напрямку, шорсткість

внутрішньої поверхні $\delta_{cm} = 0,01 \dots 1$ мм. Інші розміри й кути: $d_{вк}$ – діаметр вихрової камери $d_{вк} = 5d$; h – висота вихрової камери $h = d$. Кути конусності – 60° , кут нахилу патрубку, що відводить $\gamma = 30^\circ$ (рис. 4в). Статистичним методом отримана степенева залежність, що встановлює зв'язок між діодністю й названими параметрами:

$$D = 2,42d^{0,37} \delta^{-0,098} \nu^{0,036}.$$

Експерименти підтвердили адекватність рівняння, максимальна похибка не перевищує 11%.

Метою подальших досліджень була кількісна оцінка гідродинамічного процесу вихороутворення у вихровому діоді при наступних граничних умовах: швидкість у вхідному перетині 0 м/с; тиск у вихідному перетині 101кПа; час моделювання 15 с; крок моделювання 0,05 с. У момент часу 0,1 с від початку моделювання у вхідному перетині створювався стрибок швидкості до 3 м/с, а вихідним параметром була зміна тиску в тому ж вхідному перетині діода. Аналіз отриманого графіка залежності тиску від часу показує, що процес виходу на максимальний гідравлічний опір досить тривалий і умовно може бути розділений на чотири етапи: перший етап незначного гідравлічного опору, що не супроводжується його помітним зростанням, його тривалість приблизно 0,5 с; другий етап характеризується різким підвищенням тиску, швидкість його зростання близько 110 кПа/с, його тривалість до 1,5 с; третій етап починається з моменту помітної затримки швидкості зростання й закінчується виходом на сталий режим, його тривалість до 5,5 с (тут враховується час до досягнення тиску $0,98 p_{\max}$); четвертий етап – сталий режим.

У ході обробки результатів розрахунку у кожному часовому шарі були побудовані лінії потоку (у кількості 20), які дозволили встановити характерні етапи вихороутворення, властиві виділенням етапам (рис. 6).

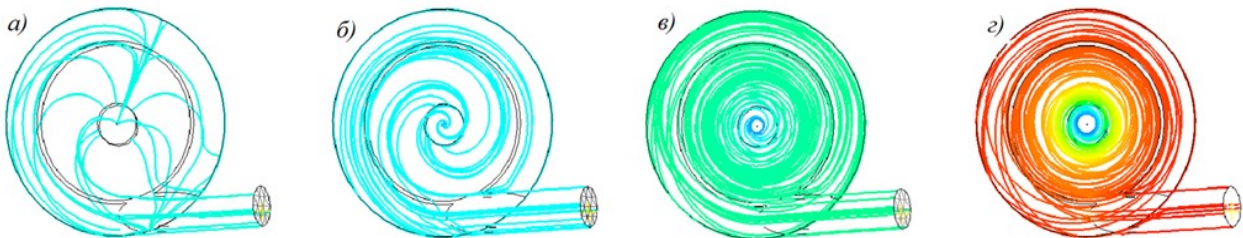


Рисунок 6 – Характерні лінії потоку на різних етапах вихороутворення

Безвихрова стадія (рис. 6,а); закручування потоку (рис. 6,б) – лінії течії роблять повний оберт усередині вихрової камери; формування розвиненого вихру (рис. 6,в) починається з утворенням замкнених ліній течії в пристінковій зоні найбільшого діаметра вихрової камери, у цей час утворюється кавітаційна порожнина на виході з вихрової камери; режим, що встановився, характеризується максимальним тиском на периферії вихрової камери (рис. 6,з). Очевидно, що інерційність системи, яка оцінюється постійною часу T , пов'язана з кількістю рідини, що бере участь у процесі вихороутворення.

З метою зменшення постійної часу T виходу вихрового діода на максимальний зворотний опір був створений вихровий діод з конфузуром на вході й дифузуром на виході й пропорційно зменшеними основними геометричними розмірами (рис. 7).

У результаті досліджень отримана формула для визначення постійної часу T з варіативною формою імпульсу для діода

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

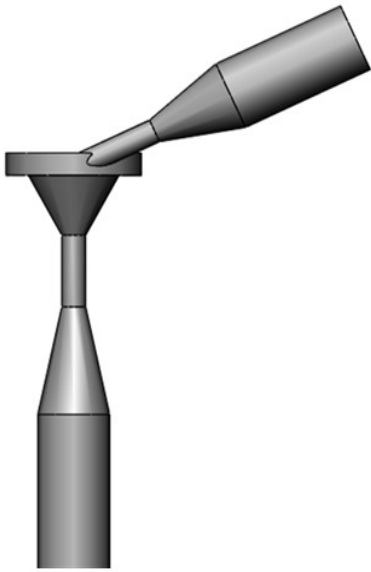


Рисунок 7 – Проточна частина вихрового діода зменшеного розміру

де Δt – час зростання імпульсу тиску, 0,05 ... 2 с; d – діаметр входу у вихрову камеру 0,05...0,3, м; v – швидкість течії на вході у вихровий діод 1...3 м/с.

Отримане рівняння використане для врахування динамічних властивостей діода в алгоритмі програми, що моделює гідравлічний удар із установленими на трубопроводі вихровими діодами.

З метою підвищення діодності пристрою, запропоновані гібридні діоди, які виконані на базі зворотного клапану й оснащені вихровою камерою. (рис. 8). Розрахунки, виконані при моделюванні потоку через діод із двома вихровими камерами методом кінцевих елементів (рис. 8*в*), показують, що діаметр отвору 9 при збереженні тієї ж діодності може бути збільшений на 10 ... 15% (у діапазоні діаметрів 20 ... 40 мм).

Моделювання робочого процесу гібридного гідравлічного діода із гвинтовим підведенням (рис. 8 *г, д, е*) з умовним проходом $D_y = 100$ мм і діаметром отвору в дні гільзи 30 мм показало, що його опір відповідає опору отвору в тонкій стінці діаметром 12,2 мм. Таким чином, використання даного типу діода дозволяє суттєво збільшити розмір прохідного перетину й підвищити надійність роботи засобу захисту від гідравлічних ударів в умовах забруднених вод порівняно із простими гідравлічними діодами.

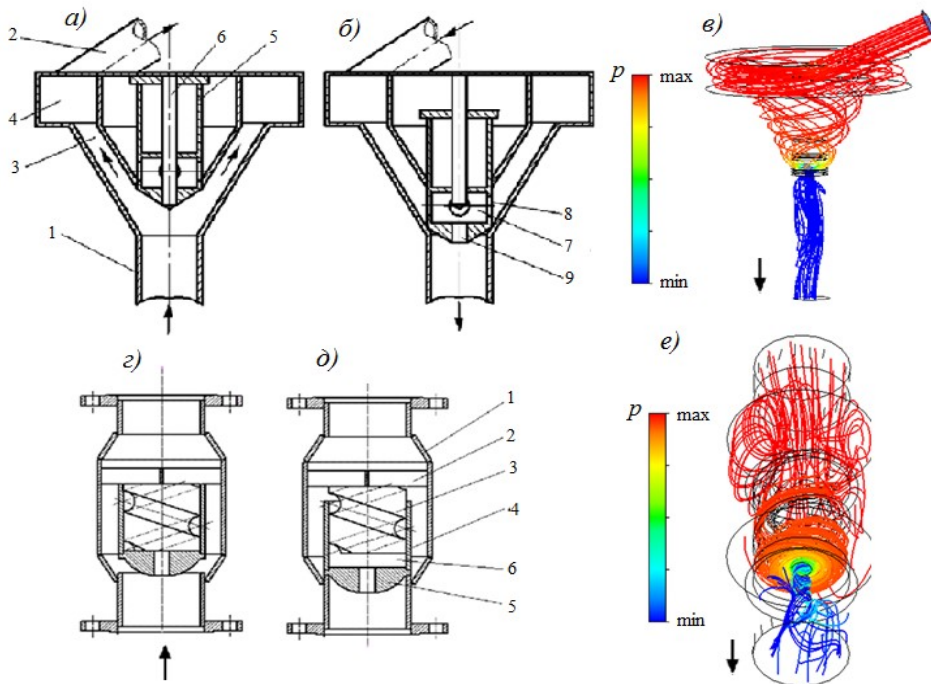


Рисунок 8 - Гібридний гідравлічний діод із двома вихровими камерами при прямому – *а*), зворотному русі рідини – *б*), лінії току в діоді при зворотному плинні; гібридний гідравлічний діод із гвинтовим підведенням при прямому – *г*), зворотному русі рідини – *д*), лінії току в діоді при зворотному плинні *е*)

Для визначення ефективності роботи вихрового діода, як засобу захисту від гідравлічних ударів, з урахуванням його інерційних властивостей використано три безрозмірні характеристики:

по-перше, величина відносної зміни витрат у сталому режимі $q_0 = \frac{\overline{Q_0}}{Q_0}$, де відповідно $\overline{Q_0}, Q_0$ витрата в захищеній та незахищеній вихровим діодом водонапірній установці;

по-друге, величина відносної питомої енергії потоку рідини в трубопроводі водонапірної установки $e_{вд} = \frac{\overline{N_o} Q_o}{Q_o N_o}$ де, $\overline{N_o}, N_o$ – відповідно потужності, що витрачаються на транспортування рідини в захищеній і незахищеній водонапірній установці в сталому режимі роботи;

по-третє, величина відносного підвищення тиску при раптовому відключенні насоса в захищеній вихровим діодом водонапірній установці $\Delta p = \frac{p_{max}}{p_0}$, де p_{max}, p_0 , відповідно, максимальний тиск при перехідному процесі й тиск на початку трубопроводу в сталому режимі роботи.

Якщо перші дві величини можна розрахувати, скориставшись елементарними формулами для визначення параметрів робочого режиму насоса, то для розрахунків третьої величини потрібна зміна математичної моделі й програми розрахунків на ПК для врахування особливостей динамічної характеристики вихрового діода. Однак об'єднати моделювання методом кінцевих елементів процесу у вихровому діоді й розрахунки перехідного режиму в довгому трубопроводі методом характеристик у середовищі Matlab досить важко, тому використана наближена форма динамічної характеристики діода. При цьому прийняте допущення про те, що залежність гідравлічного опору вихрового діода від часу буде справедливе при будь-яких змінах витрати рідини. Якщо $вд$ – номер ділянки, наприкінці якої встановлений діод, а довжина цієї ділянки $L_{вд}$, то граничні умови в точці установки діода наступні:

$$Q_{вд}(L_{вд}, t) = Q_{вд+1}(0, t),$$

$$p_{вд}(L_{вд}, t) = \begin{cases} p_{вд+1}(0, 1) + a_{\min} Q_{вд+1}^2(0, 1) & \text{якщо } Q_{вд+1}(0, t) \geq 0 \\ p_{вд+1}(0, t) - a_{вд}(\tau) Q_{вд+1}^2(0, 1) & \text{якщо } Q_{вд+1}(0, t) < 0. \end{cases}$$

Перше рівняння вказує на те, що миттєве значення витрати до і після вихрового діода вважається однаковим. Система рівнянь показує, що прямий опір вихрового діода при розрахунках миттєво приймається рівним a_{\min} , а для визначення зворотного опору в кожному випадку зворотної течії рідини, з врахуванням особливостей динамічних процесів у вихрових діодах, приймаються віртуальні локальні системи координат з осями координат - $a_{вд}$ і осями абсцис τ (локальний час). Момент часу $\tau=0$ визначається за умови - $Q_{вд+1}(0, t) < 0$. Розрахунки показують, що навіть при середніх параметрах діодів досягається ефект зменшення максимального тиску при гідравлічному ударі (рис. 9).

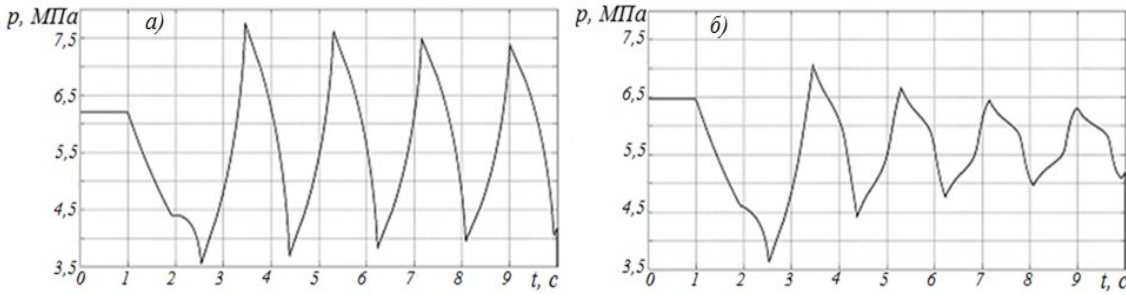


Рисунок 9 – Перехідний процес на початку трубопроводу водонапірної установки при гідравлічному ударі: а) без захисту; б) з вихровим діодом $T_{vd} = 0,9$ с, $D_{vd} = 20$

У третьому розділі розглянуто застосування додаткового (резервного) трубопроводу для зменшення величини гідравлічних ударів (рис 10,а). Суть цього методу полягає у впуску в напірний трубопровід води в момент зниження тиску після відключення насоса. Складність розрахунків при цьому полягає в тому, що об'єкт, з якого проводиться впуск, необхідно розглядати, як систему з розподіленими параметрами, у якій так само збуджується коливальний процес, викликаний початком руху води, що впливає на режим течії рідини у основному трубопроводі. При цьому визначальне значення має гідравлічний опір перпусного трубопроводу, за допомогою якого можна регулювати ступінь компенсації зміни витрат. Для одержання математичної моделі описані граничні умови в місці з'єднання з урахуванням наявності зворотного клапану в перпусному трубопроводі.

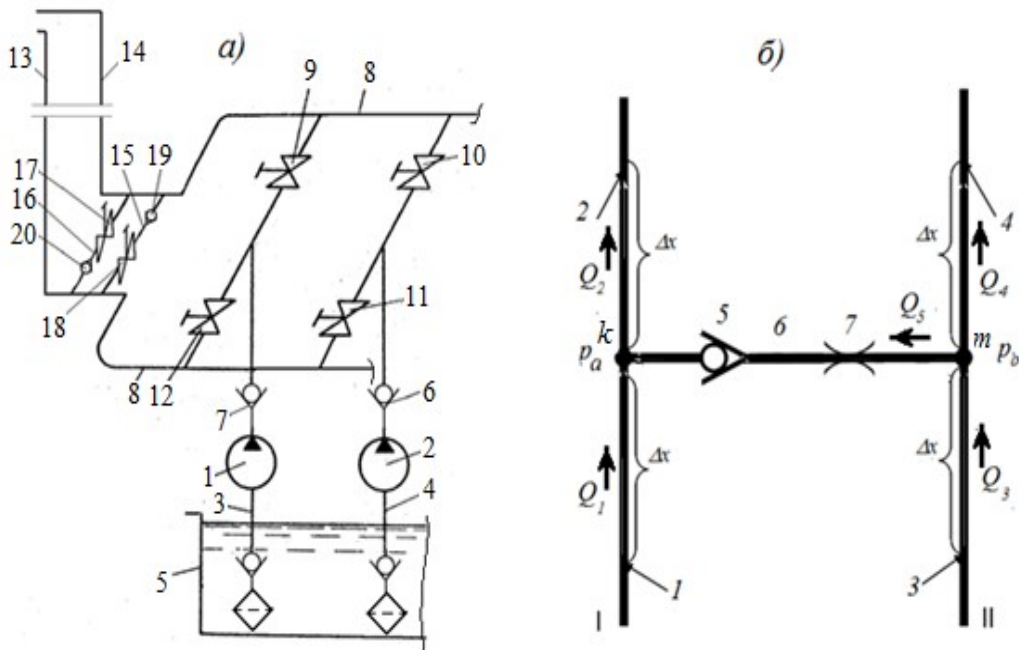


Рисунок 10 – Спрощена гідравлічна схема водовідливної установки а) і схема з'єднувального вузла б): I – робочий трубопровід, II – резервний трубопровід, 1,2,3,4 – позначення точок, 5 - зворотні клапани; 6 - перепускний трубопровід, 7 – дросель що має гідравлічний опір еквівалентний перепускному трубопроводу

Робочий трубопровід I (рис. 10,б) і резервний трубопровід II розбиваються на ділянки таким чином, що точка k (місце підключення перепускного трубопроводу до робочого) і точка m (місце підключення перепускного трубопроводу до резервного) є граничними. У цих точках течія рідини описується системою рівнянь наступного виду:

співвідношення між тисками –

$$\begin{aligned} p_1(L_1, t) &= p_2(0, t) = p_a, \\ p_3(L_3, t) &= p_4(0, t) = p_b, \end{aligned}$$

баланси витрат –

$$Q_3(L_3, t) = Q_3 \quad Q_4(0, t) = Q_4 \quad Q_4 = \begin{cases} Q_3 - Q_5 & \text{якщо } Q_5 > 0 \\ Q_3 & \text{якщо } Q_5 \leq 0 \end{cases},$$

де $p_1(L_1, t), p_a, Q_1(L_1, t), Q_1, p_2(0, t), Q_2(0, t), Q_2$ - відповідно, тиск і витрата наприкінці й на початку ділянок робочого трубопроводу знизу й зверху від точки підключення перепускного трубопроводу;

$p_3(L_3, t), p_b, Q_3(L_3, t), Q_3, p_4(0, t), Q_4(0, t), Q_4$ - відповідно, тиск і витрата наприкінці й на початку ділянок резервного трубопроводу знизу й зверху від точки підключення перепускного трубопроводу;

Q_5 - витрата через перепускний трубопровід;

L_1, L_3 - відповідно, довжини ділянок робочого й резервного трубопроводів знизу від точки підключення перепускного трубопроводу.

Спільне розв'язання цих рівнянь із рівняннями характеристик, записаними в кінцево-підсумковій формі, дає рівняння другого порядку з одним невідомим

$$\rho g a_p Q_5 |Q_5| + (m_j + m_l) Q_5 = Z_n Q_5, \text{ де } a_p - \text{гідрравлічний опір перепускної трубки};$$

Z_n - число, що визначається станом потоку в прилягаючих до точок a, b відрізків трубопроводів і відоме за результатами розрахунків на попередньому часовому шарі або з початкових умов; $m = \rho c/S$, S - площа перетину відповідної ділянки трубопроводу; $j=1,3; l=2,4$ - точки на трубопроводі.

Результати моделювання перехідних процесів у трубопроводах шахтної водовідливної установки, де показується істотне зниження тиску при гідравлічному ударі (рис. 11):

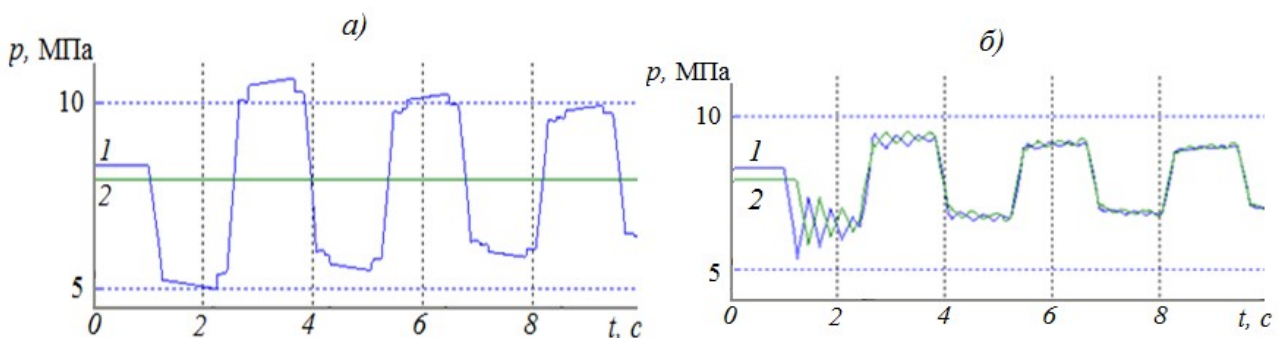


Рисунок 11 – Перехідний процес в початковому перетині робочого (1) і резервного (2) трубопроводу: а) – не обладнаних засобами захисту, б) - у захищеній водовідливній установці з опором перепускного трубопроводу, еквівалентним отвору діаметром 70 мм

Четвертий розділ присвячений експериментальним дослідженням, пов'язаним із одержанням напірних характеристик натурального зразка діода при прямому й зворотному русі води. Експериментальний стенд був зібраний в умовах навчальної лабораторії кафедри «Енергомеханічні системи» ГВУЗ «ДонНТУ» (рис. 12) і містив у собі наступні елементи: ємність 1 об'ємом $0,6 \text{ м}^3$ (рис. 12), насос 2 типу 2 DK20, що має номінальну подачу 550 л/хв при номінальному напорі 25 м , потужність двигуна 1500 Вт , насос 3 моделі Dtm – 18, що має номінальну подачу 420 л/хв при номінальному напорі 18 м , потужність двигуна 1100 Вт , крани 4, 5, 6, 7, 8 трубопроводи виконані із твердої поліетиленової труби з умовним проходом 50 мм , яка використовувалася на напірній частині стенда, діод 9, зливний трубопровід 10. Витрата води в системі визначалася за допомогою діафрагми 11 (відносна площа пристрою звуження $m_{11}=0,49$) і сопла Вентурі 12 ($m_{12}=0,41$), падіння тиску на яких вимірялося диференціальним манометром 13 типу ДМ-50. Падіння тиску на вихровому діоді вимірялося зразковими манометрами (клас точності $0,4$) 17 і 16, манометр 14 –показував тиск на виході насоса 3, манометр 15 – резервний. Крани 6 і 7 дозволяли одержувати паралельне або послідовне з'єднання насосів. Кран 8 перебував у положенні «закрито».

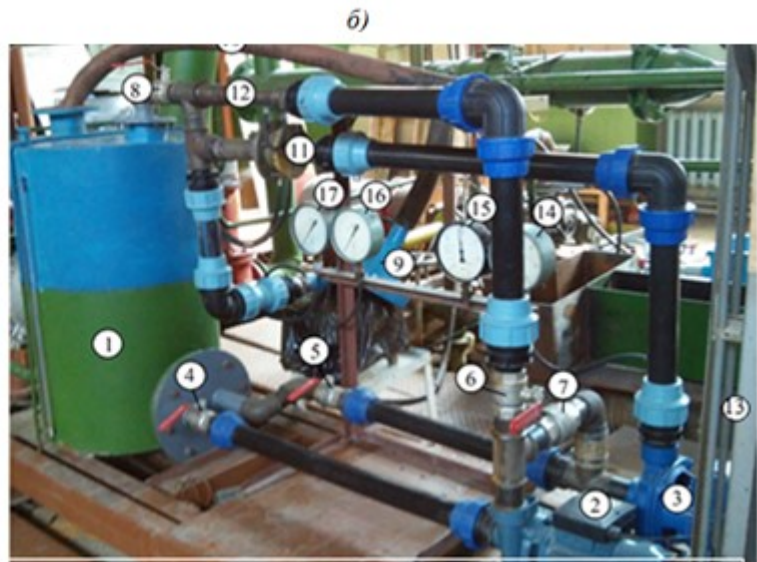
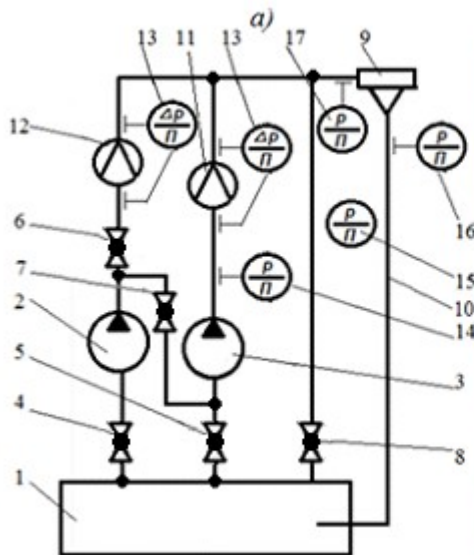


Рисунок 12 – Експериментальний стенд: *а)* – схема, *б)* – зовнішній вигляд: 1 - циліндрична ємність об'ємом $0,6 \text{ м}^3$; 2, 3 - насоси; 4, 5, 6, 7, 8 - крани; 9 - вихровий діод; 10 - трубопровід; 11 - діафрагма (35 мм); 12 - сопло Вентурі ($32,5 \text{ мм}$); 13 диференціальне манометр типу ДМ - 50; 14, 15, 16, 17 манометри; *б)* - зовнішній вигляд

Експериментально отримані витратні характеристики вихрового діода, які показали розбіжності з розрахованими значеннями до 8% у зоні максимальної діодності. Отримана діодність 12 . Для досліджень динаміки процесу утворення вихору стенд (рис. 12) був додатково устаткований датчиком тиску типу «Сапфір 22-ДИ» на тиск $0 \dots 6 \text{ кгс/см}^2$. Для запису показань датчика в часі використовувався аналого-цифровий перетворювач (АЦП) 1 (рис. 13,а) типу NI USB – 6008, сигнал з якого оброблявся комп'ютером із використанням програмного комплексу Labview. Стрибок витрати здійснювався за допомогою відкриття крана 6 важільно-вантажним методом (при відкритому крані 4). Відповідний графік зміни тиску показав, що відхилення розрахункової постійної часу вихрового діода від експериментальної (рис. 13,б) не перевищує 5% .

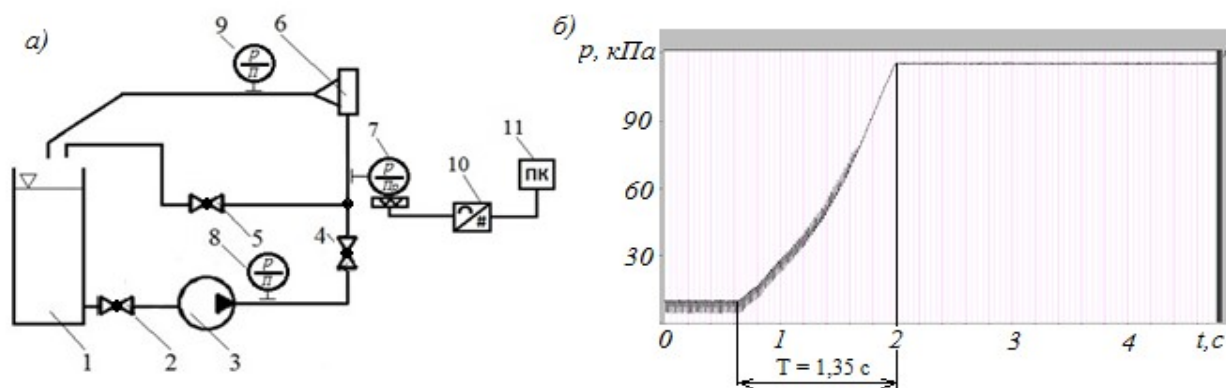


Рисунок 13 – динамічні випробування: а) - схема експериментального стенду: схема; 1 – резервуар; 2, 4, 5 – крани; 3 – насос; 7 – датчик тиску «Сапфір 22 – ДІ», 6 – вихровий діод; 8, 9 – контрольні манометри 10 – АЦП NI USB – 6008, 11 – ПК;

У п'ятому розділі наведені методика та рекомендації з розробки й застосування перспективних засобів захисту водонапірних установок від гідравлічних ударів. Що стосується вибору вихрового діода, то спочатку рекомендується приймати умовний прохід вихрового (D_{min}) діода рівним діаметру трубопроводу, далі за отриманими формулами або по номограмі визначається його діодність і постійна часу. Якщо постійна часу більше фази гідравлічного удару, то слід перейти на менший умовний діаметр діода. Далі на координатному полі $e_{\text{вд}}$, q_0 , $\Delta p = f(D_{min})$ будуються відповідні графіки (рис.

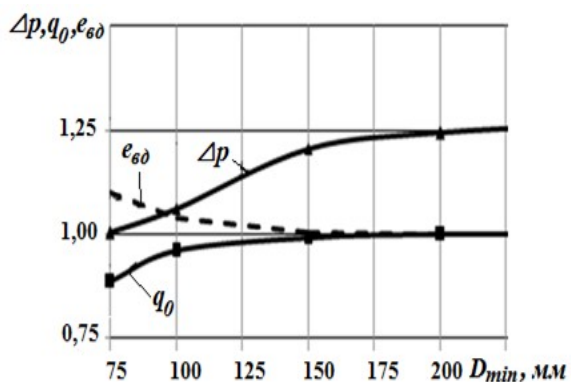


Рисунок 14 – Графіки залежностей $e_{\text{вд}}$, q_0 , $\Delta p = f(D_{min})$ для вибору умовного діаметру діода

бопровід. Очевидно, що матеріальні витрати при цьому на реалізацію проекту захисту будуть мінімальними. Розрахунки в розглянутому випадку зводяться до визначення гідравлічного опору перепускного трубопроводу (рис. 10), для чого необхідно скористатися програмою розрахунків паралельних трубопроводів, створеною на базі розробленої математичної моделі гідравлічного удару. Результатом розрахунків буде еквівалентний діаметр отвору d_{nn} , опір якого дає мінімальне підвищення тиску в напірних трубопроводах. Потім розраховується раціональне значення гідравлічного опору перепускного трубопроводу. Далі складається розрахункова схема на базі проектного креслення вузла з'єднання трубопроводів і таблиця відповідних коефіцієнтів місцевих опорів. Наступним кроком необхідно розрахувати з урахуванням цих коефіцієнтів і втрат по довжині перепускного трубопроводу його сумарний гідравлічний опір для різних діаметрів труб і вибрати той діаметр, який дає найближчий до необхідного опір.

14), за якими обирається D_{min} . Далі розробляється креслення вихрового діода з урахуванням геометричної подібності. Якщо по питомих витратах на транспортування води вихровий діод не влаштовує замовника, то слід застосувати гідравлічний діод, при чому, якщо вода відносно чиста, можна використовувати діод з отвором у тарелі клапана, при забрудненій рідині краще себе покаже гідравлічний діод з байпасом, оснащений вихровим діодом.

Установка з додатковим (резервним) трубопроводом набуває особливої актуальності, якщо по нормах проектування для даної насосної станції передбачається резервний тру-

У розділі також розглядається комбінація застосування гідравлічного діода, розташованого в кінцевому перетині напірного трубопроводу, оснащеного додатковим резервуаром, а також технічні рішення, які були запропоновані, запатентовані й попередньо проаналізовані, але обсяг необхідних досліджень яких виходив за рамки даної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача мінімізації матеріальних витрат на ефективний захист водонапірних установок від гідравлічних ударів шляхом обґрунтування раціональних параметрів робочих процесів і областей застосування перспективних засобів захисту - струминних діодів із граничною двадцятиразовою діодністю й додаткового (резервного) вертикального напірного трубопроводу діаметром 50 ... 300 мм, що забезпечує зниження капітальних витрат в 3 і більше разів порівняно з відомими засобами.

Основні наукові й практичні результати роботи полягають у наступному:

1. На основі аналізу апріорної інформації встановлена можливість мінімізації матеріальних витрат на ефективний захист водонапірних установок від небезпечних підвищень тиску рідин, що перекачуються, при використанні гідравлічних і струминних діодів, що забезпечують підвищений зворотний опір, а також додаткових (резервних) трубопроводів, з'єднаних з основними за допомогою перепускного трубопроводу.

2. Обґрунтована як раціональна область розташування в трубопроводі засобів захисту від гідравлічних ударів з підвищеним зворотним опором – остання восьма частина його довжини, що дозволяє підвищити їх ефективність.

3. Розроблені фізичні й математичні моделі робочих процесів засобів захисту водонапірних установок від гідравлічних ударів із забезпеченням підвищеного зворотного опору напірного тракту за допомогою гідравлічних і струминних діодів, використання яких дозволило встановити раціональні значення їх робочих та конструктивних параметрів.

4. За результатами рішення математичних моделей робочих процесів вихрових діодів, у тому числі чисельними методами, встановлені як раціональні: конусність вихрової камери – 60° , кут зворотного підведення рідини - 30° , діапазон шорсткості робочої поверхні 0,01 ... 1 мм, циліндрична форма вихрової камери й відсутність зони зменшення діаметру на вході в конічну частину вихрової камери. Отримане рівняння регресії, що встановлює зв'язок між діодністю й швидкістю руху води (у діапазоні швидкостей 1 ... 3 м/с), діаметром входу в діод (у діапазоні діаметрів 50 ... 300 мм), шорсткістю стінок (0,01 ... 1 мм).

Визначені області ефективного застосування струминних і гідравлічних діодів: так на трубопроводах довжиною до 400 м доцільно застосовувати гідравлічні або гібридні діоди, при більших довжинах – вихрові. При цьому, у випадку можливого збільшення витрат на транспорт рідини, зона застосування вихрових діодів розширюється.

5. Доведена можливість мінімізації матеріальних витрат на ефективний захист водонапірних установок від небезпечних коливань тиску за допомогою резервних напірних трубопроводів насосних установок, які з технологічних міркувань мають такий трубопровід, при цьому амплітуда коливань тиску у гідросистемі знижується як мінімум у два рази. Для ефективного гасіння гідравлічного удару з'єднання основного й резервного трубопроводів здійснюється перепускною трубкою, що має менший (ніж робочі трубопроводи) діаметр і яка оснащена зворотним клапаном. Місця з'єднання пере-

пускнуго з напірними трубопроводами повинні перебувати по можливості в безпосередній близькості зі зворотними клапанами.

6. Проведені експериментальні дослідження робочого процесу натурального зразка вихрового діода (діаметр входу – 50 мм, діаметр вихрової камери 282 мм) на стенді з застосуванням методів планування експерименту й статистичної обробки їх результатів. Експериментальним шляхом доведена ефективність використання діода як засобу захисту від гідравлічних ударів. Встановлено, що постійна часу вихрового діода є сумісною з фазою гідравлічного удару. Підтверджена адекватність розробленої математичної моделі робочого процесу вихрового діода із допустимим збігом розрахункових і експериментально отриманих статичних і динамічних характеристик вихрового діода мають розбіжність менше 15%

7. Розроблені методика розрахунку та проектування вихрових діодів, а також метод інженерного розрахунку гідравлічних параметрів перепускнуго трубопровода для установки з додатковим (резервним) трубопроводом, що дозволяє ефективно захистити насосну установку від небезпечного гідравлічного удару.

Розроблені конструкції вихрових діодів, гідравлічного діода, гібридних діодів захищені патентами України на корисні моделі та схеми водовідливної установки із застосуванням резервного ставу – патентом на винахід

8. Результати роботи використані: при робочому проектуванні головної водовідливної установки блоку №10, ш/у «Покровське» (інститутом ПАТ «ДОНДІПРО-ШАХТ») (очікувана річна економічна ефективність використання резервного трубопроводу даної шахтної водовідливної установки порівняно із застосуванням відомих гасителів гідравлічних ударів перевищує 380 тис. грн.); ПАТ НПО «Нумес» при розробці заходів щодо захисту від гідравлічних ударів на шахтних водовідливних установках із заглибними насосами, у результаті яких вдалось запобігти аварійних ситуацій, зокрема, на водовідливні висотою 440 м із занурювальними насосами фірми «Pleuger» PN82-20 шахти «Чорноморка» ВАТ «Лисичанськвугілля».

Запропоновані напрямки подальшого вдосконалювання засобів захисту водонапірних установок від гідравлічних ударів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бойко Н.Г. Выбор оптимальных способов функционирования и базовых параметров средств защиты трубопроводов от гидравлических ударов / Н.Г. Бойко, В.П. Овсянников, М.В. Оверко // Наукові праці ДонНТУ Серія: Гірничо-електромеханічна.–2012.– № 23 (196). – С. 30-35.

2. Кононенко А.П. Анализ динамических процессов в параллельно включенных трубопроводах водоотливной установки/ А.П. Кононенко, В.П. Овсянников, М.В. Оверко // Наукові праці ДонНТУ Серія: Гірничо-електромеханічна.–2012.– №2 (24). – С. 133-141.

3. Овсянников В.П. Алгоритм построения расчетной модели системы защиты параллельно соединённых напорных трубопроводов водоотливных установок. / В.П. Овсянников, В.М. Оверко, М.В. Оверко // Наукові праці ДонНТУ Серія: Гірничо-електромеханічна.–2013.– №2 (26) . – С. 205-212.

4. Кононенко А.П. Программное дросселирование как метод защиты водоотливной установки от гидравлического удара / А.П. Кононенко, В.П. Овсянников, М.В. Оверко // Наукові праці ДонНТУ Серія: Гірничо-електромеханічна.–2012.– №3 (25) . – С. 96-103.

5. Кононенко А.П. Совершенствование гидроимпульсаторов изменением гидравлических параметров ударного трубопровода / А.П. Кононенко, В.П. Овсянников, М.В. Оверко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях.–2015.–№5(979). – С. 119-123.

6. Кононенко А.П. Выбор основных параметров вихревого диода для предотвращения гидравлических ударов в вертикальных трубопроводах/ А.П. Кононенко, В.П. Овсянников, М.В. Оверко //Вестник Национального технического университета ХПИ. Серія: Математическое моделирование в технике и технология.–2015.–№6(1115). – С. 40-49.

7. Оверко М.В. Экспериментальное исследование эффективности рабочего процесса вихревого диода для защиты от гидроударов / М.В. Оверко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2016. - № 2(8). – С. 29-36. (входить до наукометричної бази Scopus).

8. Патент на корисну модель 16951 Україна, F16L 55/02. Клапан для захисту від гідравлічних ударів / Оверко В.М., Замко Ю.О., Оверко М.В.; заявник і патентовласник Донецький національний технічний університет.–№u200510628; заявлено 10.11.05; опубл. 15.09.06, Бюл. № 9.

9. Патент на корисну модель 68287 Україна, МПК F 25 В 41/00. Струминний діод для теплових насосів/ Оверко В.М., Селівра С.О., Оверко М.В., Ніколенко Д.Ю.; . заявник і патентовласник Донецький національний технічний університет. .– №u201109208 заявлено 22.07.11; опубл. 26.03.12, Бюл. № 6.

10. Патент на корисну модель 75770 Україна, МПК F1 6 L 55/04. Струменевий діод / Кононенко А.П., Оверко В.М., Оверко М.В., Гончаров А.М.; заявник і патентовласник Донецький національний технічний університет.–№u201206292; заявлено 12.06.12; опубл. 10.12.12, Бюл. № 23.

11. Патент на корисну модель 79188 Україна, МПК F 16 L 55/02. Спосіб гасіння енергії хвиль при гідравлічному ударі/ Кононенко А.П., Оверко В.М., Овсянников В.П, Оверко М.В., Баязитов І.Р.; заявник і патентовласник Донецький національний технічний університет.–№u201212886; 13.11.12; опубл. 25.03.13, Бюл. № 7.

12. Патент на корисну модель 88736 Україна, МПК В 01 D 45/12. Струминний діод / Кононенко А.П., Оверко В.М., Оверко М.В., Лактионова Ю.О. . заявник і патентовласник Донецький національний технічний університет.–№u201313354; заявлено 18.11.13; опубл. 25.03.14, Бюл. № 7.

13. Патент на корисну модель 89206 Україна, МПК F 16 К 15/00. Зворотний клапан / Кононенко А.П., Оверко В.М., Овсянников В.П., Оверко М.В, Старожук А.Ю. . заявник і патентовласник Донецький національний технічний університет.– №u201313668; заявлено 25.11.13; опубл. 10.04.14, Бюл. № 7.

14. Патент на корисну модель 89287 Україна, МПК В 01 D 45/12. Вихровий гідравлічний діод / Кононенко А.П., Оверко В.М., Овсянников В.П., Оверко М.В., Шпаков А.О.; заявник і патентовласник Донецький національний технічний університет.– №u201314334; заявлено 09.12.13; опубл. 10.04.14, Бюл. № 7

15. Патент на корисну модель 89315 Україна, МПК F 16 L 55/04. Струменевий діод / Оверко В.М., Селівра С.О., Овсянников В.П., Оверко М.В, Кузавка О.В.; заявник і патентовласник Донецький національний технічний університет.–№u201314671; заявлено 16.12.13; опубл. 10.04.14, Бюл. № 7.

16. Патент на корисну модель 90045 Україна, МПК F 25 В 41/00. Струминний діод / Кононенко А.П., Оверко В.М, Оверко М.В., Одоладов Б.П.; . заявник і патенто-

власник Донецький національний технічний університет.–№u201314273; заявлено 06.12.13; опубл. 12.05.14, Бюл. № 9.

17. Патент на корисну модель 97743 Україна, МПК Е 02 D 19/10. Шахтна водовідливна установка / Кононенко А.П., Оверко В.М., Овсянников В.П., Оверко М.В., Хоменко Р.С.; заявник і патентовласник Донецький національний технічний університет.–№u201406416; заявлено 10.06.14; опубл. 10.04.15, Бюл. № 7.

18. Патент на винахід 110208 Україна, МПК Е 02 D 19/10. Шахтна водовідливна установка / Кононенко А.П., Оверко В.М., Овсянников В.П., Соловейко Г.В., Оверко М.В.; заявник і патентовласник Оверко М.В.–№a201214889; заявлено 25.12.12; опубл. 10.12.12, Бюл. № 23.

19. Оверко М.В. О защите водоотливных установок от гидравлических ударов / Оверко М.В.// XIII Промислова гідраліка і пневматика : матеріали науково-технічної конференції, Чернігів , 19-20 березня 2012 р., матеріали конференції. – Вінниця: «ГЛОБУС-ПРЕС», 2012 – С. 133

20. Оверко М.В. Повышение давления в импульсе гидроимпульсатора с помощью струйного диода. / Оверко М.В. //Вітчизняна та зарубіжна наука на початку другої декади ХХІ століття (м. Київ, 2 березня 2013 р.) : тези доп. – Київ : Центр наукових публікацій, 2013. – С. 94

21. Оверко М.В. Конструктивный анализ и оптимизация вихревого диода / Оверко М.В. // XVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Гідромеханіка в інженерній практиці» (м. Київ, 21-24 травня 2013 р.) : тези доп. – Київ : КПІ, 2013. – С. 55-56

22. Оверко М.В. Защита от гидроудара шахтного водоотлива / Оверко М.В.// Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП «Промислова гідраліка та пневматика». – м. Одеса, 18-19 вересня 2013 р., матеріали конференції. – Вінниця: «ГЛОБУС-ПРЕС», 2013 – 147с.

23. Оверко М.В. Исследование динамики струйного диода / Оверко М.В.// XIX Міжнародна науково-технічна конференція «Гідромеханіка в інженерній практиці» (м. Кіровоград, 21-24 травня 2014 р.) : тези доп. – Київ : КПІ, 2014. – С. 48

24. Оверко М.В. Исследование гидродинамических процессов в вихревом диоде/ А.П. Кононенко, М.В. Оверко // XX Міжнародна науково-технічна конференція «Гідромеханіка в інженерній практиці» (м. Київ, 26-29 травня 2015 р.) : тези доп. – Київ : КПІ, 2015. – С. 54-55.

АНОТАЦІЯ

Оверко М.В. Обґрунтування раціональних параметрів робочих процесів і областей застосування перспективних засобів захисту водонапірних установок від гідралічних ударів. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 - гідралічні машини і гідропневмоагрегати.- Сумський державний університет, Суми , 2016.

У дисертаційній роботі визначено, науково обґрунтовано і вирішено задачу захисту від гідралічних ударів водонапірних установок за допомогою великогабаритних діодів або додаткових (резервних) трубопроводів.

Створено і досліджено математичні моделі водонапірного трубопроводу зі змінним гідралічним опором, робочого процесу великогабаритного вихревого діоду з конічним входом у вихрову камеру і відведенням, виконаним на її торцевій поверхні, перехідного процесу у водонапірній установці, яка враховує в наближеній формі динамі-

чні властивості вихрового діоду. Моделі використані для вдосконалення вихрового діоду і отримання залежності його діодності від визначальних чинників. Доведено ефективність роботи запропонованих захисних засобів. Підтверджено адекватність результатів аналітичного моделювання.

Ключові слова: водонапірна установка, гідравлічний удар, робочий процес, математична модель, трубопровід, захист, гідравлічний опір, вихровий діод.

АННОТАЦИЯ

Оверко М.В. Обоснование рациональных параметров рабочих процессов и областей применения перспективных средств защиты водонапорных установок от гидравлических ударов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.17 – гидравлические машины и гидропневмоагрегаты.- Сумский государственный университет, Сумы, 2016.

В диссертационной работе определена, научно обоснована и решена задача защиты от гидравлических ударов водонапорных установок с помощью крупногабаритных диодов или дополнительных (резервных) трубопроводов. Исследования выполнялись аналитически, с помощью математического моделирования численными методами, в том числе методом конечных элементов и экспериментально. Круг исследований ограничен водонапорными установками, имеющими высоту подъема воды более 400 м с потерями напора на сопротивления не более 10%, и гидравлическими ударами, возникающими при неплановом отключении насосного агрегата.

Создана математическая модель водонапорного трубопровода с переменным гидравлическим сопротивлением и методика ее использования для определения параметров переходных процессов. Определены рациональные области расположения средств повышения обратного сопротивления на трубопроводе. На основе анализа и результатов исследований предложены новые решения средств защиты от повышенных давлений при гидравлическом ударе - гидравлические, струйные и гибридные диоды. Сформулирован ряд параметрических и технологических требований к диоду. Синтезирована математическая модель рабочего процесса крупногабаритного вихревого диода с коническим входом в вихревую камеру и отводом, выполненным на ее торцевой поверхности, достоверность которой подтверждена по данным экспериментов, проведенных за рубежом и опубликованных в открытой печати. Модель использована для совершенствования формы разработанного в рамках поставленных требований вихревого диода и получения зависимости его диодности от определяющих факторов (скорости, диаметра входа, шероховатости). Кроме того, с помощью модели исследованы динамические свойства вихревого диода, определена регрессионная зависимость, позволяющая рассчитывать постоянную времени вихревого диода. Установлено четыре этапа образования вихря, имеющие качественные различия, после момента начала движения воды в обратном направлении.

Построена математическая модель переходного процесса в водонапорной установке, которая учитывает в приближенной форме динамические свойства вихревого диода. Подтверждена возможность применения вихревых диодов для защиты от гидравлических ударов гидросистем.

Разработаны диоды, сочетающие в себе некоторые положительные качества гидравлических диодов (высокая диодность) и преимущество вихревого диода, заключающиеся в возможности создания увеличенного проходного сечения, названные ги-

бридными. Проведено моделирование их рабочего процесса, подтвердившее эффективность таких устройств.

Выполненные в рамках диссертационной работы экспериментальные исследования подтвердили адекватность результатов аналитического исследования, проведенного с помощью математической модели рабочего процесса вихревого диода.

Создана математическая модель переходного процесса в водонапорной установке с дополнительным (резервным) напорным трубопроводом и соединительной линией между двумя трубопроводами, которая позволяет подобрать такое гидравлическое сопротивление, что величина приращения давления при гидравлическом ударе снижается минимум в два раза. Данная система защиты применена в проекте водоотлива блока №10 шахтоуправления «Покровское», смонтирована и введена в эксплуатацию.

Разработаны рекомендации по инженерному расчету параметров перепускной линии, соединяющей основной и дополнительный (резервный) трубопровод водонапорной установки, позволяющие существенно снизить величину гидравлического удара.

Ключевые слова: водонапорная установка, гидравлический удар, рабочий процесс, математическая модель, трубопровод, защита, гидравлическое сопротивление, вихревой диод.

ANNOTATION

Overko M.V. Objective of rational parameters of work processes and applications of advanced remedies of hydraulic device from water hammer. – Manuscript.

Thesis for a candidate's degree in Technical Sciences: speciality 05.05.17 - Hydraulic machines and hydropneumatics aggregates. – Sumy State University, Sumy, 2016.

The problem of protection against water hammer of pumping stations with the help of large-sized diodes or additional (reserve) of pipelines. Is stated and scientifically solved in the thesis.

Mathematical models of water head pipe with a variable hydraulic resistance, work process of large-sized vortex diode with a conical inlet in the swirl chamber and outlet formed as its front surface. The transition process in hydraulic device with takes into account the dynamic properties of vortex diode. Models are used to improve the vortex diode and receive the dependence of diodicity from the depending factor. The effectiveness of the proposed protective measures is proved. The adequacy of the results of analytical modeling is confirmed.

Keywords: water pump installation, water hammer, mathematical model, pipeline protection, hydraulic resistance, a vortex diode, working process.