Гнатів Роман Маріянович. Розвиток наукових основ прогнозування гідравлічних параметрів неусталених потоків в технологічних процесах.- Дисертація д-ра техн. наук: 01.02.05, Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". - Київ, 2014.- 309 с.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

На правах рукопису



Гнатів Роман Маріянович

УДК 532.54.013.2

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ПРОГНОЗУВАННЯ

ГІДРАВЛІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕУСТАЛЕНИХ ПОТОКІВ

В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

01.02.05 – механіка рідини, газу і плазми

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Науковий консультант:

Яхно Олег Михайлович,

заслужений діяч науки і техніки України

доктор технічних наук, професор

***Ідентичність всіх примірників дисертації***

****ЗАСВІДЧУЮ:**

*Вчений секретар спеціалізованої*

*вченої ради* **І. Коньшин/**

Львів – 2014

ЗМІСТ

ПРИЙНЯТІ ПОЗНАЧЕННЯ……………………………………………………………...5

ВСТУП…………………………………………………………………………………….8

РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ………………….……….15

1.1.Систематизація і узагальнення класифікації неусталених рухів рідини…………15

1.2.Сучасний стан та огляд розвитку досліджень неусталених течій……...……..….19

1.2.1. Теоретичні дослідження періодичних неусталених рухів...……………………22

1.2.2. Розв’язок конкретних задач неусталеного руху в’язкої нестисливої рідини…24

1.2.3. Розв’язок конкретних задач з використанням моделі стисливої рідини……....25

1.2.4. Використання моделі плоскопаралельного руху рідини……………………….26

1.3.Теоретичні та експериментальні дослідження перехідного режиму неусталеної течії в трубопроводах………..……………………………………………..………..28

1.4.Аналіз праць про сповільнення неусталених турбулентних потоків…….………31

1.5.Експериментальні дослідження нестаціонарних течій в трубах………..………...34

1.5.1. Періодичний неусталений рух в циліндричних трубах.………………….…….34

1.5.2. Гідравлічні характеристики аперіодичних неусталених течій…………………38

1.6. Висновки по розділу. Постановка задачі досліджень.………………………..…..40

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ТА ГІДРАВЛІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАМІНАРНИХ ПРИСКОРЕНИХ ТЕЧІЙ В ТРУБАХ……………...…………...…….42

2.1. Постановка і математичне формулювання задачі …………………..……………42

2.2. Використання моделі із врахуванням дисипації енергії та її асимптотичне виведення для неусталеного потоку рідини..……………………………………46

2.3. Розв’язок задач неусталених течій рідини в трубопроводах операційним методом на основі моделі із врахуванням дисипативних процесів..……………55

2.4. Розв’язування задачі про неусталений рух рідини прямим методом із застосуванням моделі, що враховує дисипацію енергії…....………………….…58

2.5. Виведення моделі для неусталеного потоку нестисливої рідини……….……….62

2.6. Застосування одновимірної моделі для аналізу неусталених течій рідини в трубах………………………………………………………………..………………65

2.7. Основні залежності для чисельного розрахунку середньої швидкості і тиску в неусталених потоках……………………………………….………………………68

2.8. Аналіз розподілу поздовжніх швидкостей і розвитку динамічного примежового шару…………………………………………………………………………...….…79

2.9. Порівняльний аналіз розподілу радіальних швидкостей…………………………92

2.10. Особливості зміни величини дотичного напруження на стінках труби за розгінного руху……………………………………………………………………97

2.11. Коефіцієнти опору і місцевого тертя трубопроводів за ламінарної неусталеної течії рідини……………………………………………………………..………...104

2.12. Висновки по розділу…………………………………………………………..….117

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНОГО РЕЖИМУ РОЗГІННОЇ ТЕЧІЇ РІДИНИ В ТРУБОПРОВОДІ…………………...………………………………………...……...118

3.1. Особливості переходу ламінарного режиму в турбулентний за даними експериментальних досліджень……….………….…………………………...…118

3.2. Поширення турбулентності в живому перерізі потоку і розвиток когерентних структур за зміни режиму течії………………………………………………..…128

3.3. Структура потоку і розподіл поздовжніх швидкостей в процесі зміни режиму руху рідини ……………………………………………………………………..…134

3.4. Висновки по розділу………………………………………………………….……137

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСКОРЕНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО РУХУ ПЛИННОГО СЕРЕДОВИЩА В ЦИЛІНДРИЧНИХ ТРУБАХ………………….….138

4.1. Обгрунтування і виведення математичної моделі для розв’язку задач за неусталеної турбулентної течії рідини в трубах…..……………………………138

4.2. Визначення турбулентних локальних характеристик розгінного потоку…..…149

4.3. Особливості зміни дотичного напруження на стінці за турбулентного прискореного руху рідини…………………………………...…………..……….158

4.4. Дослідження законів розподілу енергії і її спектральний аналіз за вимірювання локальних характеристик прискорених течій в трубах…..……...………….….162

4.5. Аналіз зміни локальних характеристик турбулентності за перехідного режиму руху плинного середовища в трубах ………………..……..……………………173

4.6. Висновки по розділу…………………………………………………...…………..182

РОЗДІЛ 5. ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ ТА ГІДРАВЛІЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ СПОВІЛЬНЕНИХ ТЕЧІЙ………..………………………………….…………………183

5.1. Основні гідравлічні закономірності при сповільненому русі рідини…….…….183

5.2. Аналіз зміни локальних параметрів при постійному сповільнені течії…..……190

5.3. Коефіцієнт нестаціонарного тертя на стінці трубопроводу при сповільнених турбулентних течіях…...............................................................................................….203

5.4. Зв’язок між дотичними напруженнями на стінці і структурою потоку………. 213

5.5. Дослідження нестаціонарної течії рідини методами візуалізації………….….. 219

5.6. Висновки по розділу……………………………………………..…………….…..225

РОЗДІЛ 6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ…………………………….…………………………..….……………226

6.1. Характеристика експериментальної установки……….…...……………………226

6.2. Опис вимірювальної апаратури та допоміжного обладнання...………………..235

6.3. Системи запису і обробки експериментальних результатів….…………….…..249

6.4. Програми і методики проведення досліджень……..………………...…………. 263

6.5. Висновки по розділу……………………………………………………….………268

РОЗДІЛ 7. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕУСТАЛЕНИХ ПОТОКІВ І ВИСНОВКИ ЗА МАТЕРІАЛАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ…………………………………………………………….……………269

7.1. Методика розрахунку та прогнозування гідравлічних параметрів неусталених течій в напірних циліндричних трубопроводах………………………..…….…269

7.2. Висновки за результатами досліджень……………………..…………………….276

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ………………………………………………280

Додаток А. Акт передачі матеріалів дисертаційної роботи…………………………306

Додаток Б. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи…………………..307

Додаток В. Довідка про впровадження результатів дисертаційного дослідження...308

Додаток Г. Довідка про використання матеріалів дисертаційної роботи………….309

Умовні позначення

 - пульсаційна енергія турбулентності, Дж;

с – швидкість звуку в рідині, м/с;

d – діаметр труби, м;

I, J – функція Бесселя;

L – довжина трубопроводу, м;

l – довжина шляху перемішування, м;

N – кількість дослідів;

p – тиск, Па;

p0 – початковий тиск в напірному баці, Па;

q – безрозмірний тиск;

R – радіус труби, м;

r – радіальна координата, м;

Re – число Рейнольдса;

Reп – перехідне число Рейнольдса;

 – турбулентне число Рейнольдса;

 – число Рейнольдса для шару Стокса;

t – час, с;

tп – час переходу, с;

Т – період коливань, с;

Тв – безрозмірний період викидів;

z, r, φ – координатні осі в циліндричній системі координат;

vz, vr, vφ – складові вектора швидкості за координатними осями;

,,  - пульсація вектора швидкості за координатними осями;

 - динамічна швидкість, м/с;

 - безрозмірна швидкість в поздовжньому напрямку труби;

 - безрозмірна швидкість в радіальному напрямку труби;

U – середня швидкість в перерізі труби, м/с;

Uп – середня швидкість в момент переходу, м/с;

Uн – нормуюча швидкість, м/с;

U0 – швидкість течії в ядрі, м/с;

Uінт – середня швидкість отримана інтегруванням епюри швидкостей по всьому перерізі, м/с ;

W – безромірна середня швидкість;

y – відстань від стінки, м;

γ – коефіцієнт переміжності;

δ – товщина шару Стокса, м;

δв – товщина в’язкого підшару, м;

Δ – оператор Лапласа;

λм – коефіцієнт місцевого тертя;

 - безрозмірна відстань від стінки;

η – безрозмірна координата в радіальному напрямку;

 – безрозмірний параметр;

 – емпірична постійна;

λ – коефіцієнт гідравлічного тертя;

λс – параметр Стокса;

µ – коефіцієнт динамічної в’язкості, Па∙с;

ν – коефіцієнт кінематичної в’язкості, м2/с;

νт – коефіцієнт турбулентної в’язкості, м2/с;

ρ – густина рідини, кг/м3;

τ – безрозмірний час;

τ0 – дотичне напруження на стінці труби, Н/м2;

ξ - безрозмірна поздовжня координата;

 - кутова частота коливання, рад/с;

Ω – безрозмірна частота коливання.

 - дисперсія пульсації локальної швидкості;

µх – математичне очікування;

Ах – коефіцієнт асиметрії;

Sx – стандартне відхилення;

Ех – коефіцієнт ексцесу;

F (f) – спектральна густина, Дж/м;

ВСТУП

Удосконалення гідравлічних пристроїв, які призначені для управління автоматизованими технологічними процесами, а також інтенсифікація відповідних енергетичних процесів, зумовлює необхідність створення гідравлічних систем, де неусталений режим руху рідини є основним визначальним фактором. Такі гідравлічні системи, що характеризуються великою складністю та різноманітністю в даний час широко застосовують у гідротехніці, металургії, енергетиці, хімічній і харчовій промисловості. За умов неусталеного руху рідини працюють 60-70% розподільчих трубопроводів поливної техніки і 35-40% гідроліній при технічному водопостачанні.

Розрахунок таких систем зазвичай починається з розроблення фізичної моделі і виведення відповідних цій моделі математичних співвідношень, що описують у формі рівнянь поведінку робочого середовища в проточній частині пристрою. При проектуванні і експлуатації сучасних розгалужених трубопроводів, важливим є питання забезпечення надійності роботи і довговічності напірних трубопроводів і регулюючої апаратури.

Створення надійних методів розрахунку складних трубопроводів можливе лише за використання математичних моделей нестаціонарних процесів, які мають місце в таких системах. Математичне описання неусталеного руху в розглянутих гідравлічних системах можна отримати, використовуючи загальні рівняння руху рідини. При цьому, в залежності від конкретної гідравлічної системи, кінцеві математичні залежності можуть суттєво відрізнятися.

Необхідно врахувати, що при неусталеному русі виникають об’ємні локальні сили інерції, що діють на рідину. Відповідно можна очікувати впливи цих сил на явище переходу, ламінарного режиму в турбулентний, а також на подальший розвиток турбулентності і сповільнення потоку.

У рівняннях гідромеханіки, що описують неусталену течію рідини в трубах і каналах, з'являються нові змінні, що враховують турбулентний обмін, турбулентне перенесення імпульсу сил. Разом з тим система рівнянь виявляється незамкнутою. Звідси постає складне завдання проведення експериментів, на основі яких мають бути отримані емпіричні залежності, що дозволять замкнути вищезгадану систему рівнянь, що описують напірний турбулентний неусталений рух рідини.

Підготовка і проведення дослідів з неусталеними потоками рідини дозволить уточнити фізику явища. Проведення таких експериментів вимагають розроблення спеціальної методики проведення дослідів, створення засобів вимірювання і оброблення експериментальних даних.

**Актуальність теми.** Актуальність теми обумовлена: в теоретичному плані - складністю математичного опису неусталеного руху, оскільки поява при нестаціонарному русі додаткової зміни часу, призводить до ускладнень при проведенні досліджень і обробці експериментальних даних; в практичному плані - недостатністю існуючих теоретичних моделей і методів розрахунку нестаціонарних потоків рідини.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана згідно з планом науково-дослідної роботи кафедри «Гідравліки та сантехніки» Національного університету «Львівська політехніка» з проблеми 0114U000880 «Удосконалення методів прогнозування гідравлічних параметрів неусталених потоків» відповідно до науково-технічної програми Міністерства освіти і науки України.

**Мета і задачі дослідження.** Метою цієї роботи є розвиток наукових основ прогнозування гідравлічних параметрів неусталених потоків рідини в технологічних процесах.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі основні задачі:

1. Розробка методик фізичного і математичного моделювання з використанням засобів візуалізації неусталених потоків рідини з врахуванням двомірності їх течії і аналізу впливу сил інерції на характер руху;
2. Експериментальне визначення локальних характеристик нестаціонарного потоку з метою порівняння їх із результатами чисельного розрахунку за математичними моделями розподілу швидкостей, тисків, середньої швидкості і дотичних напружень на стінках трубопроводу.
3. Розробка адекватної з реальними умовами математичної моделі, що описує

фізичні явища неусталеного руху стисливої рідини з врахуванням дійсних початкових і граничних умов.

1. Аналіз факторів і особливостей течії рідини, що призводять до нестабілізованого турбулентного потоку, з метою врахування пульсаційних характеристик, що надасть можливість одержати закономірності розвитку процесу вихроутворення.
2. Експериментальні дослідження полів швидкостей розгінних турбулентних течій і визначення локальних характеристик перехідних прискорених потоків з метою вивчення фізичного явища, а також для перевірки фізичної моделі, що прийнята за основу математичної моделі розрахунку.
3. Експериментальні дослідження кінематичних і динамічних характеристик сповільненого потоку при переході від одного виду неусталеного руху до іншого, з метою врахування впливу сил інерції.
4. Встановлення двовимірних локальних характеристик, що дозволяють визначити інтенсивність турбулентності під час сповільнення течії рідини і при переході від одного виду неусталеного руху до іншого.
5. Вивчення процесів розподілу енергії і її спектральний аналіз, а також вимірювання локальних характеристик потоків. Оцінка турбулентних характеристик цих потоків на основі статистичного аналізу.

9) Розробка комплекту програмного забезпечення для повної статистичної обробки дослідних даних.

**Об’єкт дослідження.** Гідравлічні процеси в неусталених потоках в’язкої рідини у циліндричному трубопроводі.

**Предмет дослідження.** Прогнозування закономірностей зміни гідравлічних параметрів неусталених потоків із врахуванням внутрішньої структури течії рідини.

**Методи дослідження.** В теоретичній частині роботи використана модель із врахуванням дисипативних процесів течії в’язкої рідини, яка досліджувалась варіаційним методом з врахуванням початкових і граничних умов. Використані також аналітичні методи математичного і функціонального аналізу, методи теорії розмірностей і подібності.

Неусталені поля швидкостей на експериментальних установках вимірювались

за допомогою термоанемометричної апаратури і оброблялись комп’ютерними програмами. При виконанні експериментальних досліджень використовувались статистичні методи планування і обробки результатів. Результати теоретичних досліджень порівнювались з експериментальними даними.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В дисертації удосконалені існуючі методи розрахунку гідравлічних параметрів неусталених потоків. А саме:

1) Розроблена і використана модель неусталених течій із врахуванням дисипації енергії, що описує ламінарний і турбулентний режими.

2) Розроблена і застосована методика експериментального дослідження неусталеної течії рідини в трубах на основі автоматичної системи з використанням комп’ютерних технологій і комплексу вимірювальної апаратури.

3) Одержано закони розподілу тиску і швидкостей при неусталених ламінарній і турбулентній течіях, які враховують особливості структури розглянутих потоків.

4) Отримана інформація про структуру цих течій методами візуалізації та проведено спектральний аналіз характеристик турбулентності прискореної і сповільненої течій.

5) Запропоновано нові науково-обґрунтовані уточнюючі методи розрахунку і прогнозування гідравлічних параметрів неусталених потоків в технологічних процесах.

**Практичне значення одержаних результатів.** В праці розвинуті основи вдосконалення конструкції спеціальних пристроїв для управління автоматизованими технологічними процесами різноманітного призначення та характеру. В існуючих гідросистемах, які використовуються в цих процесах до теперішнього часу відсутні ефективні методи розрахунку, що враховують особливості структури розглянутих потоків.

1) Результати цієї роботи дають можливість оцінити ефективність роботи розглядуваних систем, в результаті цього отримати економію коштів, зменшення часу проведення розрахунків і збільшити ефективність використання обладнання.

2) Експериментально показано, що сили інерції, які виникають при розгоні із стану спокою затягують виникнення турбулентного режиму і навпаки при сповільненні рівень пульсації дотичного напруження вище його рівня за рівномірної течії. При цьому значно розширюється можливість використання математичних моделей для ламінарного неусталеного руху.

3) Експериментально встановлено, що турбулентність, яка виникає в пристінних ділянках, поширюється від стінки до осі труби. Із врахуванням цього запропонована модель, яка описує зміну режиму при неусталеній течії рідини. Відповідно до цієї моделі в період розгону існує ламінарне ядро із близьким до рівномірного розподілом швидкостей в цьому перерізі і пристінна ділянка турбулентного руху, яка з часом потовщується.

4) Досліджені закони розподілу енергії і її спектральний аналіз, а також локальні характеристики турбулентності дозволяють уточнити існуючі напівемпіричні методики розрахунку нестаціонарних потоків.

5) Поєднуючи дані виконаних теоретичних досліджень із розробленими експериментальними методами, ми отримуємо можливість з достатньою точністю розрахувати і проектувати досить складні гідравлічні системи, що використовуються в різних технологічних процесах.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати, наведені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. В працях, які відображають основний зміст дисертації і опублікованих в співавторстві, співшукачу належать:

в праці [115] - врахування стисливості при нестаціонарній течії; в [118] - математична модель руху неусталеного потоку; в [119] – метод розв’язку сформульованої задачі; в [140] – методи визначення втрат напору; в [178] – запропоновано методи візуалізації нестаціонарних потоків; в [179] – обґрунтовано використання лазерного допплерівського вимірювача швидкості для дослідження неусталених потоків; в [185] – на основі аналізу стану проблеми запропонована класифікація неусталених рухів рідини; в [191] – постановка задачі дослідження на основі термоанемометричного методу; в [197] – експериментальне визначення підвищення тиску; в [227] – аналіз стану і проблеми при дослідженні лазерним доплерівським вимірювачем швидкості в каналах складної поперечної форми; в [243] – розроблено науково-технічні основи використання лазерного допплерівського вимірювача швидкості для дослідження неусталених потоків; в [245] – проведено наукове обгрунтування і порівняльний аналіз методів візуалізації; в [246] – експериментальне дослідження структури потоку; в [248] – проведення експериментальних досліджень; в [249] – аналіз результатів досліджень; в [250] – постановка і проведення експериментальних досліджень; в [251] – постановка задачі досліджень і проведення чисельного аналізу; в [252] – аналіз методів керування напірними потоками рідини.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дослідження по темі доповідались, обговорювались і отримали позитивну оцінку на 22 наукових і науково-технічних конференціях: Всесоюзна науково-технічна конференція “Використання лазерів в технології і системах передання і обробки інформації” (м. Київ, 1991р.); Науково-технічна конференція “Біологія і біотехнологія очищення води” (м. Полтава, 1992р.); III Міжнародній науково-технічній конференції “Актуальні проблеми водного господарства та природокористування”( м. Рівне, 2009р.); XIV-XVIІI Міжнародних науково-технічних конференціях “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці” (м. Чернівці, 2009р., м. Київ, 2010р., м. Вінниця, 2011р., м. Черкаси, 2012р., м. Київ, 2013р.); X-XIII Міжнародних наукових конференціях АС ПГП “ Промислова гідравліка і пневматика” (м. Львів, 2009р., м. Донецьк, 2011р., м. Чернігів, 2012р., м. Одеса, 2013р.); V Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми енерго- і ресурсоощадності”. “ENERGIA 2011” (м. Львів, 2011р.); XIII, XIV Міжнародних науково-технічних конференціях “Прогресивна техніка та технологія” ( м. Севастополь, 2012, 2013р.); IX International Scientific Conference FCE TUKE ( Kosice, Slovakia, 2012); наукова конференція “Фундаментальні та прикладні дослідження: інтеграція до світових наукометричних баз даних”(м. Харків, 2013р.); I Міжнародна конференція молодих дослідників “Водні ресурси – охоронне господарство і екотехнології”( м. Стальова Воля, Польща, 2013); X  Международная научно-практическая конференция “Актуальные научные разработки – 2014”(г. София, Болгария, 2014); Международная научно-практическая конференция “Современные научные достижения  –  2014” (г. Прага, Чехия, 2014); Международная научно-практическая конференция “Стратегические вопросы мировой науки  –  2014” (г. Пшемысль, Польша, 2014); Международная научно-практическая конференция “Перспективные научные исследования – 2014” (г. София, Болгария, 2014).

**Публікації.** Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 31 науковій праці, у тому числі : 23 статті у наукових фахових виданнях (8 написані особисто співшукачем і 15 - в співавторстві), із яких 5 входять до міжнародних наукометричних баз та 2 статті у наукових періодичних фахових виданнях інших держав; 1 авторське свідоцтво на винахід; 7 тез доповідей та матеріалів конференцій (3 написані без співавторів і 4 - в співавторстві).

Висновки за результатами досліджень

У дисертаційній роботі вирішена науково-технічна проблема розвитку сучасних теоретичних основ гідравлічних розрахунків спеціальних пристроїв, які служать для управління автоматизованими технологічними процесами найрізноманітнішого призначення і характеру. В сучасних системах згадані спеціальні гідравлічні пристрої працюють в умовах напірного неусталеного руху рідини в них, яка є основним робочим елементом. В технічній гідродинаміці відсутні загальноприйняті ефективні методи розрахунку, що враховують особливості структури розглянутих потоків при розв’язку гідравлічних задач.

Основні наукові результати і висновки дисертації полягають в наступному:

1. Запропонована нова модель руху рідини в напірній циліндричній трубі. Ця дисипативна модель дозволяє описувати у двомірній поста­новці питання неусталеної течії стисливої рідини в трубопроводах із стінками, які не деформуються. Дану модель особливо зручно використовувати для випадків, які переважно зустрічаються в практичних розрахунках. Це випадки розгінного та сповільненого руху рідини, коли швидкість руху рідини поступово збільшується або зменшується.

2. За допомогою дисипативної моделі, з використанням варіаційного методу за розгінної течії були розв’язані задачі про розподіл миттєвих швидкостей руху рідини для осьо­вого і радіального напрямів, а також величини середньої швидкості і величини тиску в окремих поперечних перерізах труби для різних моментів часу.

3. На основі виведених рівнянь проведені відповідні чисельні розрахунки, що добре узгоджуються з експериментальними даними. Було встановлено, що при розгоні рідини до виникнення в ній турбу­лентності впродовж більшої частини поперечного перерізу труби зберігається розподіл швидкостей досить близький до рівномірного. Істотні градієнти швидкостей спостерігаються лише у вузькому пристінному шарі потоку.

4. Вперше виконані відповідні теоретичні чис­ельні розрахунки, з використанням дисипативної моделі, для часткового випадку руху нестисливої рідини. Порівняння результатів цих розрахунків, що дають величини миттєвої середньої швидкості і тисків в різних поперечних перерізах труби, з відповідними експериментальними даними показало, що дисипативна модель досить добре відображає дійсне фізичне явище, яке має місце при неусталеній течії рідини, що дало можливість прогнозувати гідравлічні параметри таких потоків.

5. Експериментально показано, що під впливом сил інерції виникнення турбулентності проходить при більших числах Рейнольдса, а після її виникнення локальні характеристики відрізняються від таких за усталених рухів. При цьому значно розширюється область застосовності математичних моделей, що описують ламінарні неусталені течії.

6. Експериментально встановлено, що турбулентність, яка виникає в при­стінних областях, поширюється від стінки до осі труби. Коефіцієнт переміжності γ при цьому змінюється майже лінійно по часу. З врахуванням цієї обставини запропонована нова модель, що описує зміну режиму при розгінному русі рідини. Відповідно до цієї моделі в період розгону існує ламінарне ядро з приблизно рівномірним розподілом швидкостей в даному перерізі і пристінна область турбулентного руху, що потовщується з часом.

7. Отримано дані двовимірних локальних характеристик, що дозволяють під час розгону і сповільнення рідини визначити інтенсивність турбулентності. У роботі вперше наводяться експериментальні дані зміни по радіусу ве­личин рейнольдсових напружень в процесі розгінного і сповільненого руху рідини. На основі виміряних величин інтенсивностей турбулентності структура таких потоків розділяється на дві області. Це пристінна область з підвищеною інтенсивністю і ядро з інтенсивністю нижчою відповідних величин за усталеного руху. Товщина цих областей за розгону і сповільнення течії змінюється.

8. Виконано експериментальні дослідження локальних характеристик прискореного потоку при зміні режиму неусталеного руху. На основі дослідних даних такий потік можна також розділити на ядро і пристінну область.

9. Отримано експериментальні дані про зако­ни розподілу і спектральні густини локальних характе­ристик турбулентності розгінного потоку, які підтверджують висновки про гідравлічні закономірності зміни локальних характеристик неусталених течій, що дозволяють уточнити існуючі напівемпіричні методи розрахунку неусталених потоків.

10. В результаті експериментальних досліджень отримано локальні характеристики сповільненого потоку при переході від одного режиму неусталеного руху до іншого. Встановлено зв'язок між дотичними напруженнями на стінці і структурою потоку, що дає можливість безпомилково прогнозувати гідравлічні втрати в трубопроводах технологічних процесів.

11. За даними дослідження методами візуалізації встановлено, що на сучасному рівні розвитку практичної гідродинаміки потрібну інформацію про структуру потоку можна отримати шляхом візуалізації потоку в поєднанні із вимірю­ванням полів швидкостей і характеристик турбулентності. Розроблена мето­дика досліджень потоків за допомогою швидкісної кінозйомки, фотозйомки і лазерного допплерівського вимірювача швидкості.

12. Розроблено вдосконалений метод експериментального дослідження неусталених течій в трубах. Запропоновані методика і програми обробки експериментальних даних з виводом на друк через принтер або плотер.

13. У роботі показано, що поєднуючи дані виконаних тео­ретичних досліджень і рішень з розробленими експериментальними методами, ми отримуємо можливість досить упевнено розраховувати і проектувати складні гідравлічні системи.

14. Матеріали дисертаційної роботи впроваджені в навчальних планах вищих технічних навчальних закладах і при проведенні господарсько-договірних та науково-дослідних робіт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чугаев P.P. Гидравлические термины /Р.Р. Чугаев.- М.: Высшая школа, 1974.- 104 с.

2. Чугаев P.P. Гидравлика: Учебник для вузов/Р.Р. Чугаев.- Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1982.- 672 с.

3. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах /Н.Е. Жуковский.- М.-Л.: Гостехиздат, 1949.- 103 с.

4. Allievi L. Theorie du coup de belier /L. Allievi// Paris, Dunod.-1921.

5. Schnyder О. Drukstösse in Pumpensteigleitungen/ О. Schnyder// Schweizerische Bauzeitung.- 1929.-Nr. 6.- S. 27-29.

6. Бержерон Л. От гидравлического удара в трубах до разря­да в электрической сети/ Л. Бержерон.- М.: Машгиз, 1962.- 348 с.

7.Греб А. А. Программное обеспечение для расчета гидроудара/ А. А. Греб, Е. А. Любин, Г. Е. Короб­ков// Научно-техн. конференция студентов, аспирантов и молодых ученых Уфимского государственного нефтяного технического университета, Уфа, 2005: Сб. тезисов докладов. Кн. 2.Уфа: УГНТУ.- 2005.- С. 4-5.

8. Adamkowski Adam Экспериментальное изучение мо­делей нестационарного трения для численного мо­делирования неустановившегося течения в тру­бах. Experimental examination of unsteady friction models for transient pipe flow simulation/ Adam Adamkowski, Mariusz Lewandowski//Trans. ASME. J. Fluids Eng.- 2006.- 128, № 6.- С. 1351-­1363.

9. Христянович С.А. Неустановившееся движение в каналах и реках. В кн.: Некоторые новые вопросы механики сплош­ной среды/ С.А.Христянович.- М.: 1938.- С. 15-154.

10. Мелещенко Н.Т. Общий метод расчета гидравлического уда­ра в трубопроводах / Н.Т. Мелещенко.- Изв. НИИ Гидротехники.- 1941, № 29.- С. 5-32.