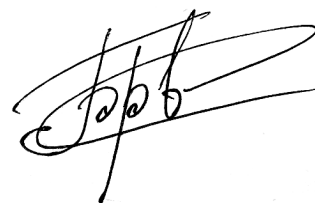


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Браженко Володимир Миколайович**



УДК 66.067.3.022.63

**ОЧИЩЕННЯ РОБОЧИХ РІДИН ПОВНОПОТОКОВИМ  
ГІДРОДИНАМІЧНИМ ФІЛЬТРОМ З ОБЕРТОВИМ ПЕРФОРОВАНИМ  
ЦИЛІНДРОМ ТА БУНКЕРОМ ДЛЯ ОСАДУ**

05.05.17 – «Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати»

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Суми 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі гідрогазових систем Національного авіаційного університету Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Мочалін Євген Валентинович**,  
Чжецзянський педагогічний університет (КНР),  
Інженерний коледж,  
професор кафедри технічної механіки.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Панченко Анатолій Іванович**,  
Таврійський державний агротехнологічний університет,  
завідувач кафедри мобільних енергетичних засобів;

доктор технічних наук, доцент  
**Роговий Андрій Сергійович**,  
Харківський національний автомобільно-дорожній  
університет, професор кафедри теоретичної механіки і  
гідравліки.

Захист дисертації відбудеться «8» червня 2018 року о 13:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.03 при Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету (м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2).

Автореферат розісланий «28» квітня 2018 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Є. М. Савченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

*Актуальність теми.* У більшості галузей сучасної промисловості в цілому ряді технологічних процесів є актуальним завдання очищення рідини від різнорідних завислих частинок домішок. Чистота робочих рідин, які задіяні в технологічних процесах, має велике значення для здобуття високої якості продукції, безвідмовного функціонування технічного обладнання, справності і тривалого терміну його роботи, зменшення трудовитрат на його обслуговування.

На сьогоднішній день найпоширенішим засобом по зменшенню кількості різнорідних завислих частинок домішки в робочій рідині є використання механічного фільтра. Даний спосіб усунення механічних домішок полягає в періодичній заміні фільтроелементів, який має декілька суттєвих недоліків: обмежений термін служби, можливість внесення забруднень в гідросистему при його заміні, збільшення гідравлічного опору протягом робочого циклу та ін.

Знаходження ефективних засобів і методів очищення фільтроелементів від механічних домішок без демонтажу фільтра є актуальним технічним завданням. Перспективним в цьому напрямку для більшості сучасних галузей є застосування повнопотокового гідродинамічного фільтра з обертовим перфорованим циліндром та бункером для осаду, який по іншому називають **ротаційним фільтром**. Його конструкція надає можливість виконувати тривале безперервне фільтрування без припинення робочого процесу в гідросистемі. Також в цих фільтрах потенційно реалізовано самовідновлення чи самоочищення поверхні фільтроелемента, за рахунок його обертання. Але зараз ротаційні фільтри не отримали широкого розповсюдження через обмежений прояв ефекту гідродинамічного очищення. Таким чином, актуальним завданням при їх вдосконаленні є дослідження потоку несучої рідини між корпусом і обертовим фільтроелементом та руху в рідині механічних частинок біля обертової поверхні та в отворах. Окремим актуальним питанням є відведення частинок домішки у бункер, який не був передбачений у жодній з існуючих конструкцій повнопотокових гідродинамічних фільтрів.

*Зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами.* Дисертаційна робота виконана відповідно до наукової програми кафедри гідрогазових систем Національного авіаційного університету (НАУ). Наведені в дисертації результати пов'язані з виконанням науково-дослідної роботи № 74/07.02.04 «Дослідження елементної бази систем авіаційного гідроприводу і гідропневмоавтоматики», у якій автор є відповідальним виконавцем.

*Мета роботи* – підвищення ефективності очищення рідин від механічних домішок повнопотоковим гідродинамічним фільтром з обертовим перфорованим циліндром і накопичувальним бункером для осаду.

Для реалізації мети дослідження повинні бути вирішені наступні **завдання**:

– провести аналіз сфер застосування гідродинамічних фільтрів, виявити фактори, що стримують широке застосування повнопотокових гідродинамічних фільтрів, та обґрунтувати доцільність використання перфорованої перегородки замість сітчастої в якості обертового фільтроелемента в повнопотоковому гідродинамічному фільтрі;

– розробити розрахункову схему і обґрунтувати розрахунковий метод дослідження гідродинаміки слабоконцентрованої суспензії в повнопотоковому гідродинамічному фільтрі з накопичувальним бункером та окремо розробити розрахункову схему й розглянути рух завислих частинок на поверхні і в отворах перфорованого циліндра, що обертається;

– спроектувати та створити експериментальну модель повнопотокового гідродинамічного фільтра з обертовим перфорованим циліндром та бункером для осаду, обґрунтувати метод аналізу гранулометричного складу дисперсних домішок та виконати експериментальні дослідження ефективності сепарації механічних частинок за допомогою даного фільтра, порівняти отримані результати з результатами чисельного моделювання;

– встановити закономірності впливу параметрів механічних частинок забруднень і режимів роботи фільтра на тонкість очищення;

– дослідити закономірності впливу форми бункера для осаду на гідродинаміку рідини і рух частинок домішки у фільтрі та осідання їх у бункері;

– розробити науково-методичні основи для створення повнопотокових гідродинамічних фільтрів з обертовим перфорованим циліндром та бункером для осаду.

**Об’єкт дослідження** – робочий процес повнопотокового гідродинамічного фільтра механічного очищення рідин з обертовим перфорованим циліндром і накопичувальним бункером для осаду.

**Предметом дослідження** є закономірності впливу робочих параметрів перфорованого циліндра, розмірів і форми бункера на ефективність сепарації механічних домішок різного діаметру та густини.

**Методи досліджень.** Рішення поставлених завдань реалізовувались із застосуванням розрахунково-аналітичних методів, чисельного і фізичного (проведення експерименту) моделювання робочого процесу в повнопотоковому гідродинамічному фільтрі з обертовим перфорованим циліндром та бункером для осаду. Зокрема, теоретичні дослідження гідродинаміки в’язкої нестисливої рідини в області між корпусом й проникною обертовою поверхнею фільтроелемента та в бункері здійснювались за допомогою осереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав’є-Стокса в циліндричній системі координат з використанням моделі турбулентності *SST k- $\omega$*  (модель Ментера). Моделювання руху частинок домішки в потоці несучої фази реалізовувалось за допомогою рівняння Бассе-Буссінеска-Озеена. При чисельній реалізації розрахункових алгоритмів використовувалися метод скінченних об’ємів, метод Рунге-Кутта для розв’язання крайових задач і задач Коші для систем звичайних диференціальних рівнянь. Експериментальні дослідження реалізовані за допомогою методів планування експерименту, стендових випробувань зразка повнопотокового гідродинамічного фільтра в лабораторії кафедри гідрогазових систем НАУ та обробки експериментальних даних із застосуванням методів математичної статистики.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у наступному:

1. Вперше розроблені науково-методичні основи створення повнопотокового гідродинамічного фільтра, в яких обґрунтована можливість заміни обертової сітчастої фільтруючої перегородки на обертовий перфорований циліндр, що сприятливо впливає на гідродинаміку течії рідини та істотно підвищує тонкість і

ефективність очищення, зберігаючи при цьому інші позитивні властивості гідродинамічних очищувачів, у тому числі:

- розроблена математична модель течії в'язкої нестисливої рідини в повнопотоковому гідродинамічному фільтрі з обертовим перфорованим циліндром та бункером для осаду;

- розроблено метод розрахунку руху механічних частинок домішки, що представлені дуже малою об'ємною концентрацією у в'язкій рідині, біля поверхні перфорованого циліндра та в області бункера, на які діють інерційні сили та сили міжфазної взаємодії;

- досліджено вплив режиму течії, параметрів рідини, частинок та форми бункера на ефективність очищення, отримано відповідні закономірності.

2. На підставі проведеного чисельного моделювання, візуалізації течії рідини та руху частинок домішки у повнопотоковому гідродинамічному фільтрі на основі вісісиметричної постановки вперше доведено позитивний вплив обертової торцевої стінки фільтроелемента, що проявляється в стримуванні поширення вихрових структур з області бункера в робочу область фільтра, та утриманні відсепарованих частинок домішки в бункері від потрапляння назад в робочу область фільтра.

3. Вперше в тривимірній постановці розглянуто рух сферичних частинок домішки біля обертової поверхні перфорованого циліндра та доведено, що вже при режимі течії, що характеризується невеликим обертовим числом Рейнольдса  $Re_{\varphi}=13030$  та радіальним –  $Re_r=192$ , виникає ефект гідродинамічного очищення за умови співвідношення діаметру частинки до діаметру отвору фільтроелемента 1:5.

4. Вперше доведено, що закрутка потоку зовні перфорованого циліндра, що забезпечує гідродинамічне очищення рідини, дозволяє виключити контакт з фільтруючою поверхнею завислих часток, що мають густину в 2...6,5 разів більшу, ніж густина несучої рідини, і розміри в 2...5 разів менші за розміри отворів фільтруючої перегородки.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються,** забезпечені шляхом проведення тестових випробувань експериментального стенду і систем вимірювань, використання апробованих методик проведення експериментів і методів узагальнення експериментальних даних на основі теорії подібності, аналізу похибки вимірювань, регресійного аналізу. Достовірність даних комп'ютерного моделювання забезпечено застосуванням апробованих методів розрахунку (метод скінченних об'ємів, метод Рунге-Кутта) з прийнятним ступенем адекватності розроблених математичних моделей реальним фізичним процесам (розбіжність менше 9%).

Достовірність результатів дослідження забезпечується коректністю постановок математичних задач, застосуванням фундаментальних законів та рівнянь гідромеханіки як вихідних положень, відповідністю змісту математичних моделей фізичній суті описуваних робочих процесів.

**Практичне значення** одержаних результатів полягає у наступному:

- обґрунтовано, що використання в якості фільтроелемента обертового перфорованого циліндра замість сітки натягнутої на каркас в повнопотоковому гідродинамічному фільтрі забезпечує підвищення ефективності сепарації частинок домішки з відносним діаметром 0,4 (відносно діаметру отвору фільтруючої

поверхні) до 95 %, що підтверджено експериментальним дослідженням;

- встановлено вплив форми бункера для осаду на ефективність утримання в ньому частинок домішки та рекомендовано використовувати у повнопотоковому гідродинамічному фільтрі бункер конічної розбіжної або циліндричної форми;

- розроблена інженерна методика розрахунку гідродинамічного повнопотокового фільтра з урахуванням конструктивних особливостей обертового перфорованого циліндра і бункера для осаду, властивостей частинок домішок і робочої рідини, що дозволяє раціонально розробити проект фільтра з врахуванням зміни режимних параметрів течії рідини в ньому та підвищити ефективність очищення даним пристроєм;

- отримано патент України на корисну модель фільтра для очищення рідин з удосконаленою конічною розбіжною формою бункера для осаду;

- основні результати досліджень впровадженні на приватному підприємстві «Компанія Крона Плюс» і в навчальному процесі кафедри гідрогазових систем Національного авіаційного університету, що підтверджено відповідними актами.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи були отримані автором самостійно. Здобувачем проведено чисельне моделювання руху несучої рідини та завислих частинок домішки у повнопотоковому гідродинамічному фільтрі з перфорованим циліндром та бункером для осаду. Проведено аналіз робочого процесу в розглянутому фільтрі та встановлені закономірності впливу режимних параметрів, конструкції фільтруючої перегородки та форми бункера, діаметру та густини домішки на ефективність очищення. Створено зразок повнопотокового гідродинамічного фільтра з обертовим перфорованим циліндром та бункером для осаду і змонтовано робочий стенд для дослідження ефективності очищення робочих рідин від механічних забруднень. Автором проведено експеримент, виконано аналіз отриманих результатів.

Всі результати були отримані під безпосереднім керівництвом наукового керівника, який спланував основні етапи роботи автора над дисертацією.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень автора доповідалися й обговорювалися на XV Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми науки» (м. Київ, 2015 р.); XII Міжнародній науково-технічній конференції АВІА-2015 (м. Київ, 2015 р.); XX, XXI, XXII Міжнародній науково-технічній конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (м. Київ, 2015 р., 2016 р., м. Черкаси, 2017 р.); XVI, XVII, XVIII Міжнародній науково-технічній конференції АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Суми, 2015 р., м. Харків, 2016 р., м. Вінниця, 2017 р.);

**Публікації.** Основні положення й результати роботи опубліковані у 16 наукових працях, у тому числі: 3 статті у спеціалізованих виданнях, затверджених переліком МОН України, 3 статті у іноземних виданнях (Польща, Литва), стаття у збірнику наукових праць «Молода наука. Технологія машинобудування» ДДМА; отримано патент України на корисну модель; 8 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура дисертації.** Дисертація складається з 4 розділів, загальний обсяг дисертації становить 151 сторінок, 53 рисунка, 8 таблиць й 3 додатка. У списку літератури – 118 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

*У вступі* розглянуто сучасний стан проблеми, обґрунтовано актуальність теми, викладена наукова новизна, сформульовані мета роботи і задачі, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети, зазначено особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію та публікації за результатами досліджень, представлені відомості про впровадження, структуру та обсяг дисертації.

*У першому розділі* викладені результати інформаційно-аналітичного огляду сучасних тенденцій розвитку пристроїв очищення робочих рідин від механічних забруднень, представлені напрямки модернізації гідродинамічних фільтрів.

Відмова гідравлічних систем у більшості галузей промисловості через збільшення забрудненості механічними домішками робочих рідин складає 20...75 % всіх відмов, а ресурс, з цього приводу, зменшується у 1,5...10 раз. Дія механічних частинок на функціонування та працездатність систем, що використовують робочі рідини, є непростим багатофакторним явищем.

В даний час для вирішення проблеми очищення рідин широкого розповсюдження набули механічні фільтри. Основне їх призначення – видалення механічних забруднень з робочої рідини шляхом накопичення забруднень на поверхні або в об'ємі фільтра, що очищає під час роботи гідросистеми. На сьогоднішній день таку продукцію в Україні пропонують, як вітчизняні так і закордонні виробники. Їхні фільтри використовуються в різноманітних галузях промисловості. Всі маніпуляції по регенерації механічних фільтрів, якщо це можливо, призводять до підвищення енерговитрат, трудовитрат і витрат спеціальних хімічних речовин, що є їх суттєвим недоліком. Також механічні фільтри тонкого очищення мають низьку брудоемкість. З'являється необхідність періодичної зупинки роботи фільтруючої установки для очищення або заміни забруднених фільтроелементів. Цей недолік вагомий, оскільки не дозволяє працювати обладнанню без зупинки протягом міжремонтного строку.

Для вирішення проблеми очищення рідин запропоновано використання гідродинамічних фільтрів, які працюють за рахунок гідродинамічного ефекту очищення. Вони позбавлені всіх вищезазначених недоліків і мають значні переваги перед механічними фільтрами. Гідродинамічний ефект очищення був вперше запропонований професором Фінкельштейном З. Л. Сутність гідродинамічного ефекту проявляється в не проникненні в фільтрат завислих частинок меншого діаметру, ніж діаметр отвору фільтрувальної перегородки внаслідок більшої дотичної складової швидкості частинки по відношенню до радіальної.

Умовою не проникнення механічної домішки крізь отвір фільтруючої перегородки є знаходження лінії дії результуючого вектора швидкості  $V$  вище точки  $A$  (рис.1):

$$\frac{d}{2c} > \frac{V_{pn}}{V_{pt}}, \quad (1)$$

де  $d$  – діаметр частинки;  $c$  – діаметр отвору перфорованої перегородки,  $V_{pn}$  – радіальна швидкість частинки,  $V_{pt}$  – дотична швидкість частинки.

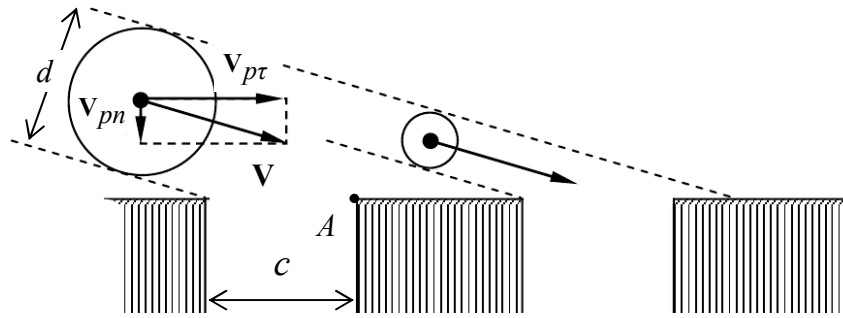


Рис. 1. Схема гідродинамічного фільтрування

На основі гідродинамічного ефекту очищення були створені гідродинамічні неповнопотокові фільтри, в яких рух рідини здійснюється за рахунок скидання її частини на злив, та повнопотокові фільтри. Гідродинамічний ефект очищення в повнопотокових фільтрах здійснюється внаслідок руху проникної фільтруючої поверхні відносно рідини, що очищається. Таким чином конструкція повнопотокових фільтрів з обертовим фільтроелементом має потенційний ресурс, який здатен організувати значно більші швидкості потоку рідини відносно фільтруючої поверхні без зливу її певного об'єму. Проте досвід використання і результати спеціальних досліджень показують недостатній прояв гідродинамічного ефекту очищення в повнопотокових гідродинамічних фільтрах з обертовим фільтроелементом, які по іншому називають **ротаційними фільтрами**. Так результати експериментальних досліджень Є. В. Мочаліна, О. В. Петренка, П. Н. Кривошея показали, що при фільтруванні води від частинок електрокорунду з розміром 20...30 мкм ротаційним фільтром з сітчастим фільтроелементом з розміром отворів 40 мкм, не вдалося отримати видалення понад 80 % забруднень. Також в роботах Є. В. Мочаліна наведені результати чисельного моделювання, де відмічається виникнення області рециркуляційного руху рідини, що охоплює одну або більше дротів сітчастої поверхні фільтроелемента, в яких рідина проходить крізь сітку в обох радіальних напрямках. За рахунок цього в деяких місцях сітки значно збільшуються місцеві значення радіальної швидкості фільтрування. Звідси виникає різке погіршення умов для гідродинамічного очищення і частинки домішки проникають у фільтрат. Для подолання цього недоліку здобувачем запропоновано замінити сітчасту фільтруючу перегородку на перфоровану. Наступним важливим завданням пов'язаним з розповсюдженням використання ротаційних фільтрів є видалення відфільтрованих домішок з робочої зони фільтра, яке може бути вирішене шляхом використання бункера для осаду з вихідним патрубком у конструкції ротаційного фільтра.

**В другому розділі** розглянуті розрахункові схеми для опису течію в'язкої нестисливої рідини в кільцевому каналі між двома коаксіальними циліндричними поверхнями з відсмоктуванням рідини крізь внутрішній обертовий проникний циліндр та в області бункера у циліндричній системі координат  $(r, \varphi, z)$ .

У даний час головним шляхом до чисельного моделювання турбулентних течій рідини та газу в техніці є застосування усереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса (RANS), які у векторній формі мають вигляд:



$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla T_e - \rho(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V}), \quad (2)$$

де  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{V}$  – вектори відносної і абсолютної осереднених швидкостей рідини відповідно;  $\rho$ ,  $p$  – густина і осереднений тиск;  $\boldsymbol{\Omega}$  – вектор кутової швидкості рухомої системи координат (обертового циліндра),  $T_e$  – ефективний тензор зсувних напруг, який знаходиться за формулою

$$T_e = \mu_e (\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T) - \frac{2}{3} \rho k I, \quad (3)$$

де  $k$  – питома кінетична енергія пульсаційного руху (кінетична енергія турбулентності),  $I$  – тензорна одиниця;  $\mu_e = \mu + \mu_t$  – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості, який дорівнює сумі відповідних коефіцієнтів молекулярної і турбулентної в'язкості.

Рівняння (2) доповнюється осередненим рівнянням нерозривності, яке для нестисливої рідини має вигляд

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0, \quad (4)$$

Для отримання замкнутої системи додано також додаткові співвідношення, що визначаються відповідною моделлю турбулентності. Для течій розглянутого типу задовільні результати забезпечує застосування моделі переносу зсувних напруг Ментера (SST  $k$ - $\omega$  модель). Вона забезпечує адекватний розрахунок усереднених гідродинамічних характеристик для закручених течій біля обмежуючих поверхонь в усьому діапазоні можливих режимів. Таким чином до (2), (4) додано диференційні рівняння переносу турбулентної енергії  $k$  і питомої швидкості її дисипації  $\omega$ :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} k) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - Y_k, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \omega) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right) + P_\omega - Y_\omega + D_\omega, \quad (6)$$

де  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\omega$  – турбулентні числа Прандтля,  $P_k$ ,  $P_\omega$  – доданки генерації турбулентної енергії та її дисипації,  $Y_k$ ,  $Y_\omega$  – дисипативна складова переносу турбулентної енергії та її дисипації,  $D_\omega$  – перехресний дифузійний доданок.

Для дослідження гідродинаміки течії рідини та руху частинок домішки в несучій фазі розглянуто дві постановки, які будемо далі називати великомасштабна та дрібномасштабна. Перша дозволила проаналізувати рух рідини і частинок домішки в області між корпусом і обертовим перфорованим циліндром та в бункері для осаду у двомірній великомасштабній постановці, без урахування проходження частинок крізь перфоровану перегородку (рис. 2). Граничні умови для руху несучої фази в цьому випадку мають вигляд (7). Дрібномасштабна постановка надала можливість розглянути процес руху частинок домішки у поверхні перфорованої перегородки та біля отворів фільтроелемента, також дозволила оцінити ефективність очищення рідини за допомогою досліджуваного фільтра. Для цього розглянуто періодичний фрагмент робочої області фільтра (рис. 3) з граничними умовами (8), де  $V_r$ ,  $V_z$ ,  $V_\varphi$  – радіальна, осьова та окружна швидкість рідини,  $Tu$  – інтенсивність турбулентності,  $\mu_t/\mu$  – відносна динамічна в'язкість,  $Q$  – витрата

рідини,  $\Omega$  – кутова швидкість обертання фільтроелемента ротаційного фільтра,  $L$  – довжина внутрішнього обертового циліндру,  $R_1$  – радіус внутрішнього обертового циліндру,  $R_2$  – радіус зовнішнього нерухомого циліндру,  $R_3$  – внутрішній радіус обертового циліндру.

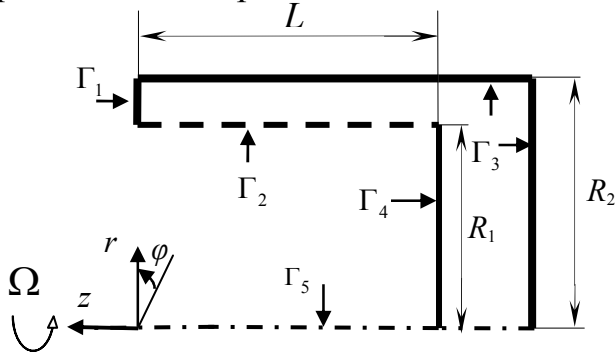


Рис. 2. Розрахункова схема великомасштабної постановки де  $\Gamma_1$  – вхід,  $\Gamma_2$  – поверхня обертового проникного циліндру,  $\Gamma_3$  – границі нерухомого корпуса,  $\Gamma_4$  – обертова торцева стінка фільтроелемента,  $\Gamma_5$  – вісь симетрії.

$$\Gamma_1: V_r = V_\phi = 0, V_z = \frac{Q}{\pi(R_2 - R_1)},$$

$$Tu = 5\%, \quad \mu_t/\mu = 10$$

$$\Gamma_2: V_r = \frac{Q}{2\pi R_1 L}, V_z = 0, V_\phi = \Omega \cdot R_1,$$

$$\Gamma_3: V_r = V_\phi = V_z = 0, \quad (7)$$

$$\Gamma_4: V_r = V_z = 0, V_\phi = \Omega \cdot r,$$

$$\Gamma_5: V_r = 0, \quad \frac{\partial V_z}{\partial r} = \frac{\partial V_\phi}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0.$$

На твердій стінці кінетична енергія турбулентності дорівнює нулю  $\partial k / \partial n = 0$  та її питома дисипація

$$\text{визначаються: } \omega = 10 \frac{6\mu}{\rho \beta_i \Delta y^2}.$$

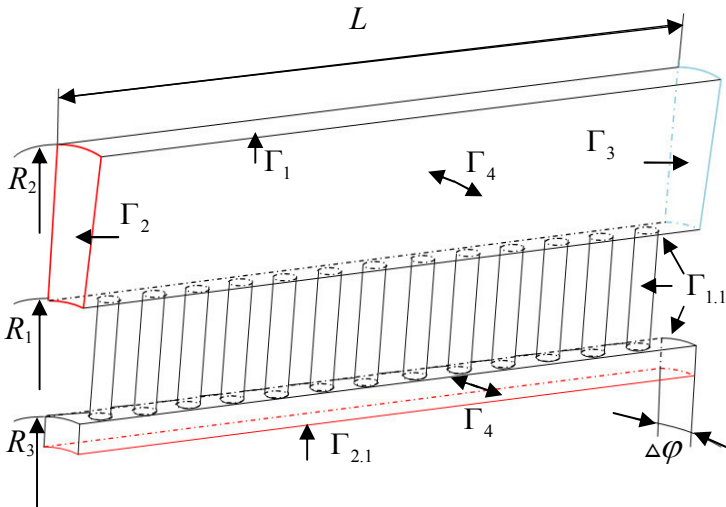


Рис. 3. Розрахункова схема дрібномасштабної постановки:  $\Gamma_1$  – нерухома стінка,  $\Gamma_{1.1}$  – обертовий циліндр,  $\Gamma_2$  – вихід в бункер,  $\Gamma_{2.1}$  – вихід фільтрату,  $\Gamma_3$  – вхід,  $\Gamma_4$  – періодична

$$\tilde{\mathbf{A}}_1: V_r = V_\phi = V_z = 0;$$

$$\Gamma_{1.1}: V_r = V_z = 0, V_\phi = \Omega \cdot r;$$

$$\Gamma_2: V_r = V_\phi = V_z = 0;$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_{2.1}: V_r = -v_o \cdot \Omega R_1 \frac{R_1}{R_3}, V_\phi = 0;$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_3: V_r = V_\phi = 0, V_z = \frac{Q}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}, \quad (8)$$

$$Tu = 5\%, \quad \mu_t/\mu = 10;$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_4: V_r(r, \phi_0) = V_r(r, \phi_0 + \Delta\phi),$$

$$V_\phi(r, \phi_0) = V_\phi(r, \phi_0 + \Delta\phi),$$

$$\Gamma / (\Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4): V_r = 0,$$

$$V_\phi = 0,$$

$$k(r, \phi_0) = k(r, \phi_0 + \Delta\phi),$$

$$\omega(r, \phi_0) = \omega(r, \phi_0 + \Delta\phi).$$

Один із самих результативних шляхів, який дозволяє виконати дискретизацію початкових рівнянь в задачах про рух рідкої фази за допомогою інтегрування систем диференціальних рівнянь в частинних похідних, є метод скінченних об'ємів. На основі методу скінченних об'ємів застосовано апроксимаційні схеми високого порядку точності з контролем монотонності для запобігання нефізичних осциляцій. Зокрема, конвективні доданки у рівняннях перенесення представлені за допомогою

модифікованої протипотокової схеми QUICK (Леонарда). Апроксимацію дифузійних доданків здійснено на основі центральнорізницевої схеми 2-го порядку. Дискретизацію за часом виконано із застосуванням неявної схеми 2-го порядку з явним трактуванням джерельних членів. Для узгодженої корекції полів швидкості і тиску застосовано удосконалену процедуру SIMPLEC. Розв'язання систем лінійних рівнянь виконувалось ітераційним методом Гауса-Зейделя. Для контролю збіжності застосовано техніку нижньої релаксації.

Для опису руху частинок домішки у потоці несучої рідини застосовано модель «пасивної домішки», в якій переміщення частинки у Лагранжевій постановці визначається диференціальним рівнянням

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \mathbf{g} + \mathbf{F}_\Sigma, \quad (9)$$

де  $\mathbf{u}_p$  – швидкість руху частинки в проекціях  $u_{pz}$ ,  $u_{pr}$ ,  $u_{p\phi}$ ;  $\rho_p$ ,  $\rho$  – густина частинки та рідини, в якій вона знаходиться;  $\mathbf{g}$  – прискорення сили тяжіння;  $\mathbf{F}_\Sigma$  – сумарна сила міжфазної взаємодії, що визначає рух частинки в потоці несучої фази та знаходиться наступним чином:

$$\mathbf{F}_\Sigma = \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_m + \mathbf{F}_a, \quad (10)$$

де  $\mathbf{F}_c$  – сила лобового опору,  $\mathbf{F}_m$  – приєднана маса рідини,  $\mathbf{F}_a$  – сила, тиску рідини на частинку в радіальному напрямку. Інші сил, що діють на частинку, в тому числі сили Бассе, сили Магнуса та броунівського руху, у наведених постановках не враховувались, оскільки вони не мають значного впливу.

Для того щоб врахувати при розрахунку турбулентні пульсації при обчисленні сил  $\mathbf{F}_c$ ,  $\mathbf{F}_m$ ,  $\mathbf{F}_a$ , замінили в розрахункових рівняннях значення середньої швидкості несучої фази  $\mathbf{U}$  на її актуальне значення  $\mathbf{U} + \mathbf{u}'$ . При розрахунку пульсаційної складової  $\mathbf{u}'$  використовувались вже обчислені дані кінетичної енергії турбулентності та статистичний розподіл випадкових величин (проекцій швидкості  $\mathbf{u}'$ ), по нормальному закону. Взаємодії частинок з твердими стінками враховувались за допомогою моделі пружного співудару.

**Третій розділ** дисертації присвячений експериментальним дослідженням. Найбільш зручним способом опису режимів течії в області між корпусом та проникним фільтроелементом, який обертається, у циліндричній системі координат  $(r, \phi, z)$  є використання чисел Рейнольдса, які характеризують радіальний та обертний рух рідини відповідно:

$$\text{Re}_r = \frac{Q}{l\nu}, \quad \text{Re}_\phi = \frac{\Omega R^2}{\nu} \quad (11)$$

Таким чином базовими параметрами системи, які вимірювали для визначення режиму течії, були кутова швидкість обертання проникного фільтроелемента  $\Omega$ , витрата фільтрату  $Q$  та кінематична в'язкість рідини  $\nu$ . Для реалізації експериментальних досліджень було розроблено зразок повнопотокового гідродинамічного фільтра з перфорованим фільтроелементом та бункером для накопичення осаду, загальний вигляд якого показаний на рисунку 4. Його головними складовими частинами є каркас фільтроелемента, на який насаджено кільце з перфорованими наскрізними отворами зовнішнім діаметром 60 мм і

внутрішнім – 56 мм, та корпус фільтра (рис. 5, *a*). Діаметр перфорації дорівнює ~500 мкм. У розібраному вигляді фільтроелемент представлений на рисунку 5, *a*, *б*. Циліндричні отвори проникної перегородки рівномірно розподілені по всій бічній поверхні кільця. Відстань між центрами отворів становить 1,25 мм в осьовому напрямку та  $2,5^\circ$  в окружному.

На каркасі фільтроелемента в області під проникним кільцем зроблено великий отвір для всмоктування фільтрату (рис. 5, *б*).

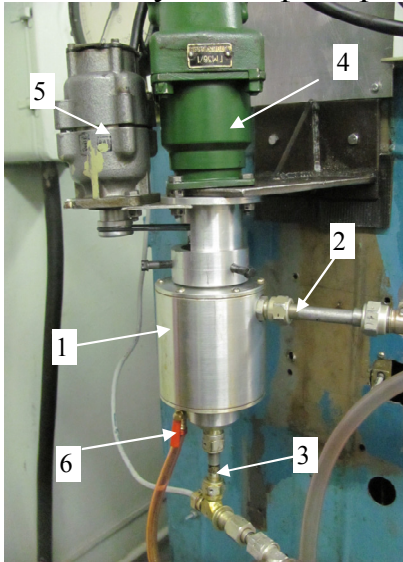


Рис. 4. Фото експериментального зразка фільтра на стенді:

1 – корпус; 2 – патрубок підведення рідини; 3 – патрубок відводу рідини; 4 – гідромотор; 5 – тахометр; 6 – отвір в бункері

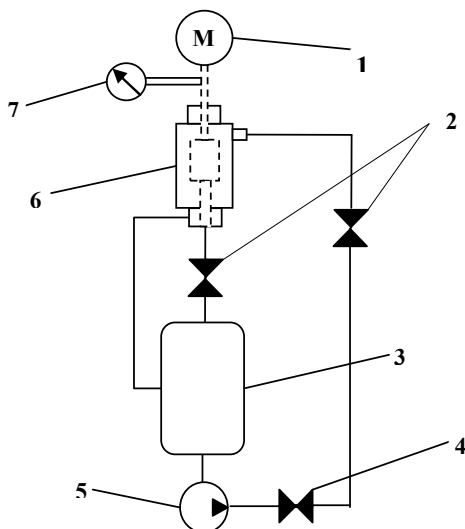
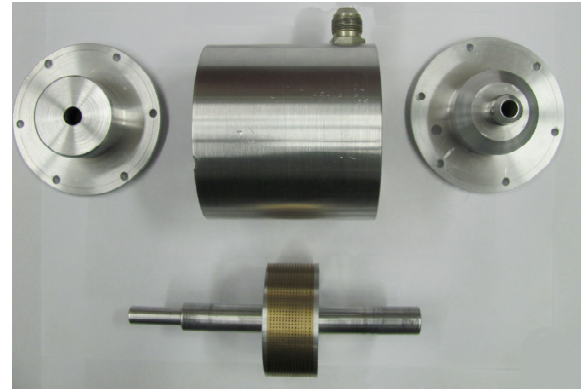
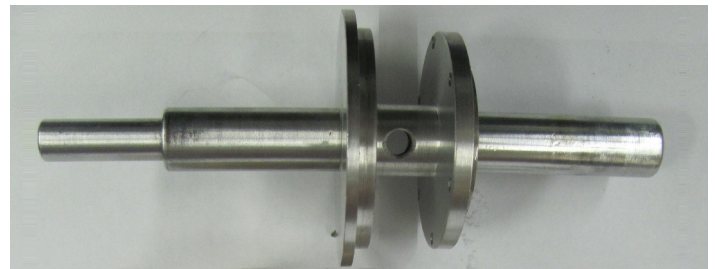


Рис. 6. Гідравлічна схема експериментального стенда:

1 – гідромотор; 2 – крани для взяття проби; 3 – бак; 4 – кран керування витратою; 5 – насос; 6 – експериментальна модель; 7 – тахометр



*a*



*б*

Рис. 5. Фото зразка фільтра в розібраному вигляді

Корпус фільтра має патрубки для входу та виходу рідини, отвір для епізодичного очищення бункеру. Каркас фільтроелемента насаджений на підшипники з ущільненнями, за рахунок чого реалізується його обертання.

Експериментальний стенд функціонує наступним чином (рис. 6): рідина, що містить тверді домішки, з ємності 3 за допомогою насоса 5 подається через вхідний патрубок на вхід досліджуваного фільтра 6. Основна частина рідини фільтрується і по лінії очищеної рідини повертається в ємність 3. Частина рідини з домішками із бункера по лінії скидання потрапляє в ту ж ємність, де перемішується з чистою рідиною і знову подається на вхід фільтра. Тим самим підтримується постійна концентрація домішок у вхідному середовищі. Витрата регулюється за допомогою крана 4. Проби рідини до і після

фільтра беруться з кранів-пробників 2. Для обертання фільтроелемента використовується гідромотор 1, а для контролю обертів – тахометричний датчик 7. У якості робочої рідини вибрано авіаційне масло АМГ-10.

Параметр відгуку в експериментальному дослідженні – це ефективність очищення, що залежить від незмінних встановлених для моделі лінійних розмірів: радіуса фільтроелемента  $R$ , його довжини  $L$  та трьох факторів, що вимірюються: кутової швидкості обертання  $\Omega$ , секундної об'ємної витрати  $Q$  і кінематичної в'язкості рідини  $\nu$ . Параметр відгуку знаходився в залежності від цих факторів через два комплексних безрозмірних числа Рейнольдса  $Re_\phi$  та  $Re_r$ , які характеризують режим течії при дослідженні ефективності очищення ротаційного фільтра. Отже у підсумку проведено експеримент з двома факторами, що змінюються.

Обрано наступні інтервали зміни варійованих факторів  $Re_\phi$  та  $Re_r$ :

$$100 \leq Re_r \leq 220, \quad 5600 \leq Re_\phi \leq 15500, \quad (12)$$

а похибки в інтервалах їх варіювання дорівнювали:

$$|\delta_{Re_\phi}| \leq 0,027 Re_\phi \quad |\delta_{Re_r}| \leq 0,023 Re_r. \quad (13)$$

Для визначення ефективності очищення у експерименті застосовувались частинки антрациту, в діапазоні розмірів 100...200 мкм. Концентрація на вході у фільтр задавалася приблизно рівною 0,02...0,03 г/л. Перед входним та вихідним патрубками ротаційного фільтра відбувався відбір проб (рис. 7) рідини за допомогою мембранного фільтра. У хімічній лабораторії визначалася забрудненість рідини методом підрахунку частинок за допомогою оптичного мікроскопа МБС-10.

По значенням кількості порохованих частинок (рис. 8) перед  $n_{пер}$  і після  $n_{післ}$  досліджуваного ротаційного фільтра визначалась відносна кількість відсепарованих частинок на 100 мл рідини (ефективність очищення) для даного режиму течії:

$$\tilde{n} = \frac{n_{пер} - n_{післ}}{n_{пер}} \cdot 100. \quad (14)$$

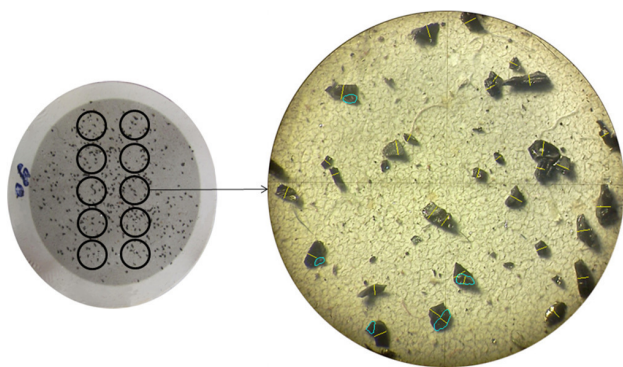


Рис. 7. Обрання одиничних зон на мембранному фільтрі для підрахунку частинок

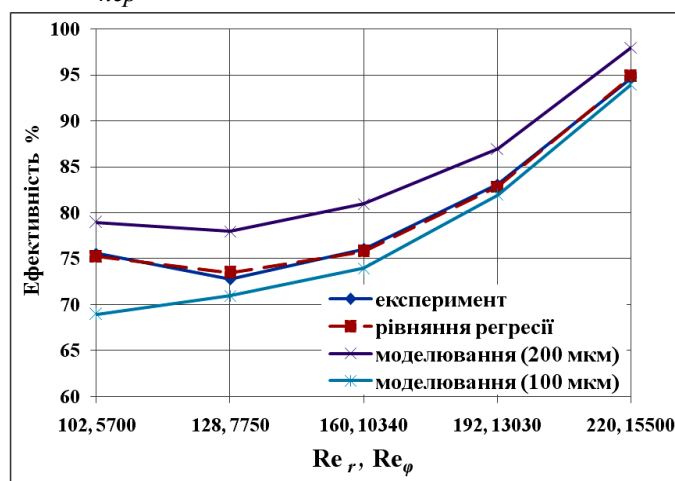


Рис. 8. Порівняння результатів експерименту та чисельного моделювання

Згідно з прийнятими діапазонами варійованих факторів  $Re_\phi$  та  $Re_r$  (12) встановили проміжки між суміжними рівнями. Для дослідження зв'язку між ефективністю очищення та робочим режимом ( $Re_\phi$ ,  $Re_r$ ) було проведено серію

дослідів, де досліджувані експериментальні точки перебували в межах інтервалу зміни варійованих факторів. Досліджувані точки експерименту охоплювали тільки зону стійкості та не зачіпали зону нестійкості, де можливе утворення вторинних вихрових включень.

У п'ятому стовпчику таблиці 1 наведено значення функції відгуку  $\tilde{n}$  (ефективності очищення). Основна оцінка розподілу величин  $\tilde{n}$ , розрахованих в паралельних спостереженнях на одному рівні  $i$ , по відношенню до середнього значення, є дисперсія  $S_i^2$ . Контроль щодо наявності значень ефективності очищення  $\tilde{n}_{ik}$ , що сильно відрізняються, здійснений за рахунок визначення відносних відхилень  $r_{ik}$ . Порівняли отримані величини  $r_{ik}$  з табличним  $r$  для найчастіше застосовуваного рівня значущості – 0,05, отримали  $r = 1,86$ .

Таблиця 1

### Значення функції відгуку і статистик її вибірки

№ рівня ( $i$ )	№ парал. виміру ( $k$ )	Кількість частинок в пробі «перед» фільтром ( $n_{пер}$ )	Кількість частинок в пробі «після» фільтра ( $n_{післ}$ )	Функція відгуку ( $\tilde{n}_{ik}$ )	Середнє значення функції відгуку ( $\bar{\tilde{n}}_i$ )	Дисперсія ( $S_i^2$ )	Відносне відхилення ( $r_{ik}$ )
1	1	351	83	76,35328	75,61474	1,66110938	0,4970795
	2	356	88	75,2809			-0,2246999
	3	370	94	74,59459			-0,686627
	4	363	93	74,38017			-0,8309518
	5	355	80	77,46479			1,7589189
2	1	244	64	73,77049	72,81295	1,40484722	0,7620464
	2	232	60	74,13793			1,3697976
	3	233	65	72,103			-0,7339669
	4	240	69	71,25			-1,6158267
	5	239	65	72,80335			-0,0099326
3	1	341	83	75,65982	76,07851	1,93393788	-0,3689173
	2	345	80	76,81159			0,6459457
	3	351	91	74,07407			-1,7661745
	4	329	73	77,81155			1,5270402
	5	338	81	76,0355			-0,0378941
4	1	301	50	83,3887	83,13394	0,4502911	0,4652204
	2	292	52	82,19178			-1,72044
	3	283	49	82,68551			-0,818854
	4	289	47	83,73702			1,1012751
	5	300	49	83,66667			0,9727977
5	1	356	21	94,10112	94,69402	0,35913371	-1,2123105
	2	349	19	94,55587			-0,2824714
	3	341	17	95,01466			0,6556254
	4	347	20	94,23631			-0,935889
	5	338	15	95,56213			1,7750454

Контроль однорідності дисперсій здійснюється за допомогою критерію Фішера, який розраховується як відношення найбільшої обчисленої дисперсії до найменшої. Розраховане значення  $F = 5,4$  порівняли з табличним  $F_T = 6,4$ . За умови  $F_T > F$  розраховані дисперсії, які відносяться до однієї сукупності, є однорідними.

Провели регресійний аналіз, визначили вид функціональної залежності параметрів відгуку від варійованих факторів, довели її адекватність:

$$\tilde{n}(\text{Re}_{r_i}, \text{Re}_{\varphi_i}) = 196,5132 - 3,995037 \cdot \text{Re}_{r_i} + 0,050146 \cdot \text{Re}_{\varphi_i} \quad (15)$$



У **четвертій** главі дисертаційної роботи наведені результати чисельного моделювання, заснованого на розрахункових схемах наведених у другій главі. Геометричні розміри в розрахунковій схемі наближені до розмірів експериментального зразку. Оскільки при порівнянні результатів чисельного моделювання дрібномасштабної постановки і експерименту розходження не перевищує 9% можна зробити висновок щодо доцільності використання представленої постановки задачі для визначення руху несучої рідини в робочій області фільтра та дослідження сепарації частинок домішки (рис. 8).

Проаналізовані картини розподілу швидкостей для дрібномасштабної постановки, підкреслено наявність в отворах фільтроелемента циркуляційної течії по типу в каверні. Розглянуто еволюцію течії рідини в залежності від зміни параметрів  $Re_r$  та  $Re_\phi$  (Рис. 9). Відмічено зменшення просвіту, через який могла б пройти частинка домішки у фільтрат. Це відбувається за рахунок збільшення кутової швидкості, яка спричиняє перекриття отвору течією, що набігає.

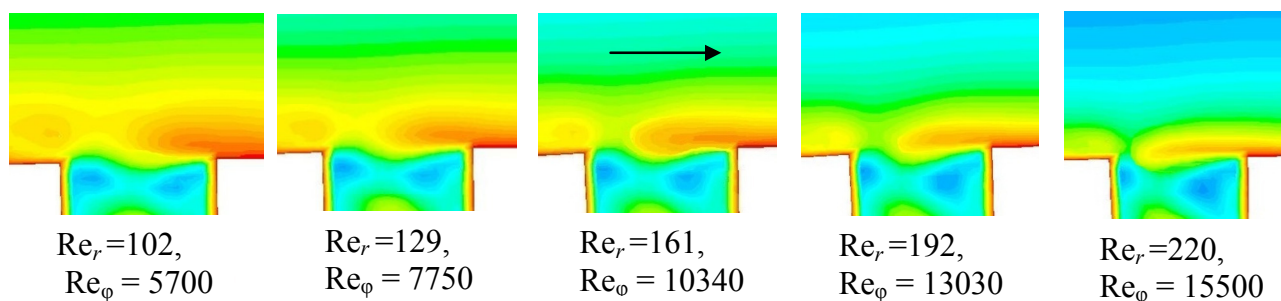


Рис. 9. Лінії течії рідини біля отвору обертового дискретно перфорованого циліндра для різних режимів течії

Розглянуто траєкторії руху частинок домішки (рис. 10). Особливо привернуло увагу проходження частинок у перші отвори від вхідного перетину. Для виявлення причин проаналізували величину радіальної та тангенціальної швидкості уздовж отворів перфорованого фільтроелемента та відмітили, що найбільші значення радіальної швидкості та найменші значення тангенціальної швидкості спостерігаються в отворах найближчих до вхідного перетину порівняно з отворами у центрі і в кінці проникної перегородки відносно входу.

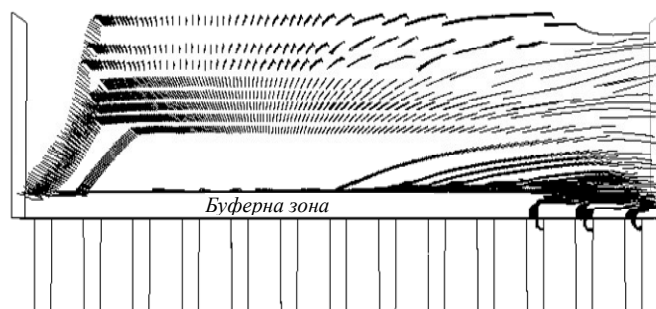


Рис. 10. Траєкторії руху частинок домішки антрациту розміром 100 мкм біля поверхні обертового проникного циліндру в тривимірній постановці для режиму течії  $Re_r = 102, Re_\phi = 5700$

Також на рисунку 10 відмічено наявність буферної зони біля перфорованої поверхні. Нижче цієї зони частинки домішки не опускаються. Присутність такого ефекту пов'язано з врівноваженістю сил діючих на частинки при закрутці робочої рідини у поверхні фільтроелемента.

Досліджуючи траєкторії руху частинок поблизу поверхні фільтроелемента на основі представлених даних полів швидкостей біля отвору і в ньому отримали більш визначену

оцінку ефективності гідродинамічного очищення рідини. В першому наближенні нехтували ковзанням фаз, вважаючи, що частинки рухаються уздовж ліній течії несучої рідини. З аналізу руху домішок діаметром 100 мкм, що у 5 разів менші за діаметр отворів в фільтроелементі (рис. 11), розглядалися саме ті частинки, що опинилися біля поверхні фільтроелемента та проходили над отворами уздовж їх діаметра.

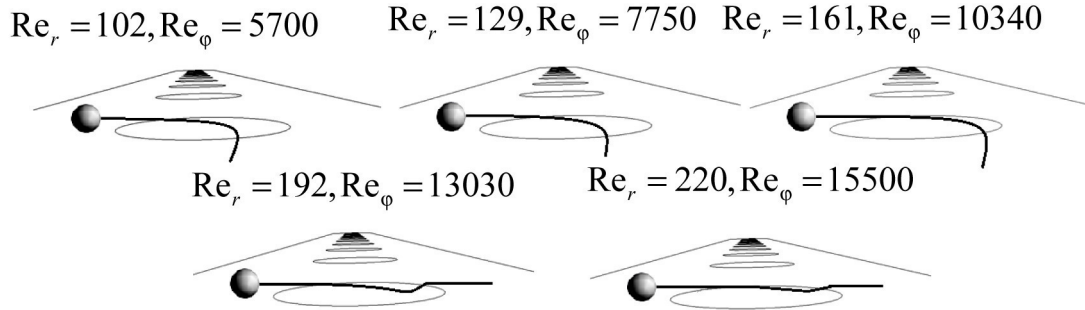


Рис. 11. Траєкторії руху частинок діаметром 100 мкм над отворами дискретно перфорованої перегородки

На рисунку 12 зображені лінії, що проходять через центри частинок, які рухаються біля поверхні перфорованого циліндра в одній з можливих точок і потенційно можуть бути захоплені потоком в отвір перегородки.

Аналіз представлених даних показує, що для перфорованого циліндра вже при відносно невисоких кутових швидкостях виключається потрапляння в прохідні отвори частинок, розмір яких в 5 разів менший розміру цих отворів, за рахунок передачі їм великих значень дотичної складової швидкості.

Для дослідження осідання в бункер різнорідних частинок домішки використовували великомасштабну постановку (рис. 12). Аналізуючи картину ліній течії треба звернути увагу на появу в області бункера вихрових структур, які з'являються внаслідок руху торцевої стінки фільтроелемента. Саме дані вихрові структури впливають на переміщення частинок з робочої області фільтра до області бункера, де вони осаджуються, що суттєво позначається на ефективності очищення ротаційного фільтра.

Для оцінки осідання забруднень різного діаметру при різних режимах течії у циліндричному бункері вводиться параметр ефективності осідання частинок:

$$k = \frac{n}{n_1}, \quad (16)$$

де  $n$  – кількість частинок, що залишилися в бункері,  $n_1$  – загальна кількість частинок, що увійшли крізь вхідний патрубок фільтра. Осереднені значення коефіцієнту ефективності  $\bar{k}$  в залежності від відносного діаметру (відносно діаметру отвору) частинок домішки  $\tilde{d}$  для діапазону їх відносних густин  $\tilde{\rho} = 2 \dots 6,5$  (відносно рідини) при різних параметрах  $Re_r, Re_\phi$  зображені на рис. 13.

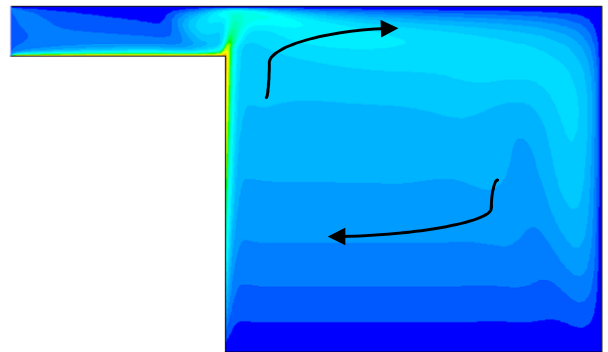


Рис. 12. Розподіл швидкості рідини АМГ-10 в ротаційному фільтрі при режимі течії  $Re_r=102, Re_\phi=5700$



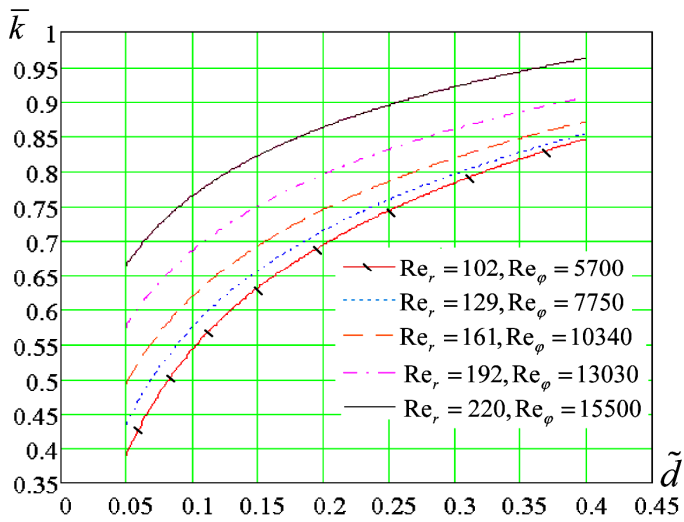


Рис. 13. Залежність осередненої ефективності очищення ротaційного фільтру від відносного діаметру домішки

постановки задачі, було розглянуто чотири схеми бункера для осаду: циліндрична, конічна збіжна, конічна розбіжна, ступінчаста. Для заданих форм було досліджено ефективність осідання частинок у бункері. Найбільшу ефективність показали циліндрична та конічна розбіжна форми. Для них проведено розширене чисельне моделювання і отримані номограми залежності. На рисунку 14, а, б зображені залежності ефективності осідання частинок для циліндричної форми бункера, а на рисунку 14, в, г для конічної розбіжної при незмінній радіальній швидкості та відносній густині частинок  $\tilde{\rho} = 5$ .

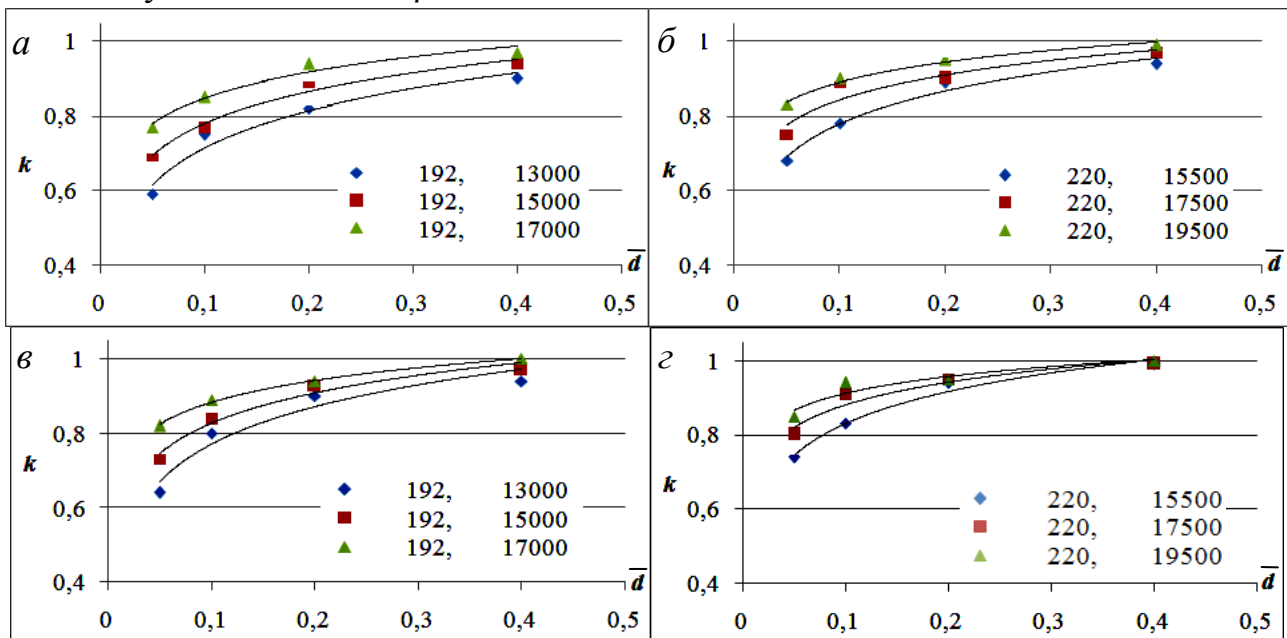


Рис. 14. Номограми для визначення ефективності очищення АМГ-10 від відносного діаметра частинок домішки при відповідних  $Re_r$  та  $Re_\phi$

Представлені результати мають практичну цінність при розрахунку та проектуванні повнопотокових гідродинамічних фільтрів з конічним розбіжним і циліндричним бункером для осаду.

Проаналізувавши отримані залежності встановлено тенденцію щодо зростання ефективності очищення ротaційного фільтру зі збільшенням діаметру частинок домішки для чотирьох розглянутих матеріалів забруднювача. Порівнюючи частинки домішки з найбільшою ( $Fe_3O_4$ ) і найменшою густиною (антрацит) можна відмітити, що домішки з більшою густиною ефективніше сепаруються. Для всіх розглянутих діаметрів спостерігається зростання коефіцієнту ефективності при зростанні режимних параметрів  $Re_r, Re_\phi$  рідини.

На основі дрібномасштабної

## ВИСНОВКИ

В дисертації вирішена актуальна науково-технічна задача – підвищення ефективності очищення робочих рідин від механічних частинок домішки повнопотоковим гідродинамічним фільтром за рахунок використання обертового перфорованого циліндра та бункера раціональної форми для збору відсепарованих домішок. Основні наукові і практичні результати та висновки роботи полягають у наступному:

1. На підставі результатів аналізу сучасного стану досягнень з питань розроблення і застосування повнопотокових гідродинамічних фільтрів висунуто ідею, що для підвищення ефективності очищення рідин даними пристроями доцільно використовувати фільтроелемент у вигляді обертового перфорованого циліндра, який забезпечує регулярний характер течії рідини біля поверхні фільтроелемента та практично однакові умови для протікання рідини крізь кожен його отвір.

2. Вперше для дослідження гідродинаміки руху слабokonцентрованої суспензії в ротаційному фільтрі розроблена математична модель з великомасштабною віссиметричною постановкою задачі руху несучої рідини у кільцевій робочій області та області бункера, яка дозволила дослідити осідання частинок домішки у бункері; розроблена математична модель з дрібномасштабною трьохмірною постановкою і періодичними граничними умовами, за допомогою якої досліджено рух частинок домішки у поверхні фільтроелемента та в його отворах.

3. Проведено експериментальне дослідження ефективності очищення робочої рідини АМГ-10 ротаційним фільтром, яке охоплювало інтервали режимних параметрів течії  $Re_\phi=5700\dots15500$ ,  $Re_r=102\dots220$ ; визначена забрудненість робочої рідини методом підрахунку частинок домішок діаметром 100...200 мкм за допомогою оптичного мікроскопа:

– за даними проведеного двофакторного експерименту отримано регресійну модель для визначення коефіцієнту ефективності очищення від частинок заданого розміру у досліджуваному інтервалі зміни варійованих факторів (розбіжність становить менше 2 %):  $\tilde{\eta}(Re_r, Re_\phi) = 196,5132 - 3,995037 \cdot Re_r + 0,050146 \cdot Re_\phi$ ;

– експериментально встановлені раціональні значення режимних параметрів течії  $Re_\phi=15500$ ,  $Re_r=220$ , при яких спостерігається найвищий показник ефективності очищення від частинок домішки антрациту діаметром 100...200 мкм, який дорівнює 95 %.

4. На основі комп'ютерного моделювання для дрібномасштабної тривимірної постановки досліджено рух сферичних частинок домішки біля поверхні обертового перфорованого циліндра. Отримано закономірності ефективності очищення для частинок відносного діаметру 0,05...0,4 в діапазоні відносної густини  $\tilde{\rho} = 2\dots6,55$ . Доведено, що зі збільшенням діаметру і густини частинки забруднення збільшується ефективність їх очищення ротаційним фільтром для інтервалу режимних параметрів течії  $Re_\phi=5700\dots15500$ ,  $Re_r=102\dots220$ :

– вперше встановлено, що вже при невеликих значеннях обертового числа Рейнольдса  $Re_\phi=13030$  та радіального  $Re_r=192$  спостерігається ефект гідродинамічного очищення;

– для кожного з досліджених режимних параметрів спостерігається наявність «буферної зони», яка не дозволяє контактувати частинкам домішки з поверхнею фільтроелемента, що позитивно впливає на ефективність очищення.

5. Шляхом чисельного моделювання на основі великомасштабної постановки отримано закономірності впливу форми бункера для осаду на ефективність осідання частинок домішки відносного діаметру 0,05...0,4. Найкращу ефективність утримування частинок домішки (99 %) показала конічна розбіжна і циліндрична форми бункера при режимних параметрах течії  $Re_{\phi}=19500$ ,  $Re_r=220$ :

– доведено стабілізуючий вплив рухомої торцевої стінки фільтроелемента на течію рідини в робочій області фільтра, яке проявляється в стримуванні поширення вихрових зон з області бункера в робочу область фільтра, що є позитивним явищем;

– вперше встановлено, що при режимних параметрах течії  $Re_{\phi}=5700...15500$   $Re_r=102...220$  за рахунок руху торцевої стінки фільтроелемента блокується повернення частинок домішки з бункера в робочу область фільтра.

6. Вперше розроблено математичні моделі, методики розрахунку, які дозволяють дослідити закономірності та особливості функціонування повнопоточних гідродинамічних фільтрів з перфорованим фільтроелементом та бункером для осаду; створено зразок такого приладу та доведено ефективність його використання для очищення робочих рідин.

7. За матеріалами дисертації розроблена методика розрахунку повнопоточних гідродинамічних фільтрів для гідродинамічної установки високого тиску на приватному підприємстві «Компанія Крона-Плюс», а окремі результати використовуються у навчальному процесі кафедри гідрогазових систем Навчально-наукового аерокосмічного інституту НАУ, що підтверджено відповідними актами впровадження.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мочалін Є. В. Аналіз руху твердих завислих часток у ротаційному фільтрі очищення рідин з накопичувальним бункером / Є. В. Мочалін, В. М. Браженко, О. Є. Мочалін // Промислова гідравліка і пневматика. – 2015. – № 1. – С. 3–9 (Наук. фах. вид.).

2. Мочалін Є. В. Вплив конструкції бункера у повнопоточному гідродинамічному фільтрі на рух частинок домішок / Є. В. Мочалін, В. М. Браженко // Промислова гідравліка і пневматика. – 2015. – № 4 – С. 15–20 (Наук. фах. вид.).

3. Мочалин Е. В. Влияние вихрей Экмана на гидродинамику несущей жидкости в полнопоточном гидродинамическом фильтре с бункером / Е. В. Мочалин, В. Н. Браженко // Молода наука. Технологія машинобудування: зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2016. – № 1 – С. 50–53.

4. Мочалин Е.В. Эффективность оседания частиц в полнопоточном гидродинамическом фильтре при изменении размера бункера / Е. В. Мочалин, В.Н. Браженко // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. – 2016. – Т. 6(10). Випуск № 2 – С. 91– 99 (Польща, eLIBRARY.RU, ResearchBib, ISI).

5. Mochalin Ye. An experimental research of the efficiency of a fluid mechanical cleaning by a rotary filter / Ye. Mochalin, V. Brazhenko, O. Yashchuk // Transport Engineering and Management. Vilnius: Technika, 2017, p. 43–46 (Литва, Index Copernicus).

6. Браженко В. М. Осідання частинок домішки різного відносного діаметру в бункері ротаційного фільтра / В. М. Браженко // Промислова гідравліка і пневматика. – 2017. – № 4. – С. 62–65 (*Наук. фах. вид.*).

7. Браженко В. Н. Теоретическое исследование эффективности механической очистки жидкости ротационным фильтром / В. Н. Браженко // *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe*. – 2017. – Т. 12(28). – Вип. № 2 – С. 17–22 (*Польща, eLIBRARY.RU, ResearchBib, ISI*).

8. Пат. № 110101 України, МПК В01D 33/00, С02F 3/08; ФІЛЬТР ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ РІДИН / Мочалін Євген Валентинович; Браженко Володимир Миколайович; заявник і патентовласник Національний авіаційний університет. – № u201602970; заявл. 23.03.2016; опубл. 26.09.2016, бюл. № 18.

9. Браженко В. М. Вплив торцевої стінки дискретно перфорованого циліндра на гідродинаміку рідини в робочій області повнопотокового фільтра з бункером / В. М. Браженко // «Політ. Сучасні проблеми науки»: XV Міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 8–9 квітня 2015 р.: матеріали конф. – К., – С. 46.

10. Браженко В. М. Ефект буферної зони між областю руху завислих частинок та поверхнею дискретно перфорованого обертового циліндру / В. М. Браженко, Є. В. Мочалін // АВІА-2015: XII міжнар. наук.-техн. конф., 28–29 квітня 2015 р.: матеріали конф. – К. – С. 17.33–17.36.

11. Браженко В. Н. Влияние конструкции буфера для осадка на гидродинамику полнопоточного гидродинамического фильтра с вращающимся фильтрующим цилиндром / В. Н. Браженко, Е. В. Мочалин // «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці»: XX міжнар. наук.-техн. конф., 26–29 травня 2015 р.: матеріали конф. – К. – С. 31.

12. Браженко В. Н. Движение несущей жидкости и сферических частиц у поверхности вращающегося цилиндра / В. Н. Браженко, Е. В. Мочалин // «Промислова гідравліка і пневматика»: XVI міжнар. наук.-техн. конф. АС ПГП, 14–16 жовтня 2015 р.: матеріали конф. – Суми, 2015. – С. 35–36.

13. Браженко В. Н. Современные тенденции и направления усовершенствования конструкции полнопоточного гидродинамического фильтра с вращающимся фильтрующим цилиндром / В. Н. Браженко, Е. В. Мочалин // «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці»: XXI міжнар. наук.-техн. конф., 24–27 травня 2016 р.: матеріали конф. – К., 2016. – С. 24–26.

14. Браженко В. М. Вплив дискретно перфорованої перегородки ротаційного фільтра на сепарацію завислих частинок / В. М. Браженко, Є. В. Мочалін // «Промислова гідравліка і пневматика»: XVII міжнар. наук.-техн. конф. АС ПГП, 19–21 жовтня 2016 р.: матеріали конф. – Харків, 2016. – С. 32–33.

15. Браженко В. М. Теоретичне і експериментальне дослідження сепарації механічних домішок у ротаційному фільтрі / В. М. Браженко, Є. В. Мочалін // «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці»: XXII міжнар. наук.-техн. конф., 23–26 травня 2017 р.: матеріали конф. – Черкаси, 2017. – С. 28.

16. Браженко В. М. Очищення гідравлічних рідин повнопотоковим гідродинамічним фільтром з обертовим перфорованим циліндром / В. М. Браженко // «Промислова гідравліка і пневматика»: XVIII міжнар. наук.-техн. конф. АС ПГП, 3–6 жовтня 2017 р.: матеріали конф. – Вінниця, 2017. – С. 16.

## АНОТАЦІЯ

**Браженко В. М. Очищення робочих рідин повнопотоковим гідродинамічним фільтром з обертовим перфорованим циліндром та бункером для осаду.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – «Гідравлічні машини й гідропневмоагрегати» – Сумський державний університет, Суми, 2018.

В дисертації вирішена актуальна науково-технічна задача – підвищення ефективності очищення робочих рідин від механічних частинок повнопотоковим гідродинамічним фільтром, а саме ротаційним, в якому запропоновано використовувати у якості фільтроелемента обертовий перфорований циліндр та бункер для осаду для збору відсепарованих частинок.

На основі чисельного моделювання, яке базується на усереднених по Рейнольдсу рівняннях Нав'є-Стокса (RANS) зі застосуванням моделі турбулентності переносу зсувних напруг (SST  $k-\omega$  модель) Ментера, проведено дослідження течії несучої рідини біля обертової фільтруючої поверхні та області бункера для осаду ротаційного фільтра. Доведено нерівномірність протікання рідини у радіальному напрямку крізь перфорований циліндр. Крізь отвори розташовані біля вхідного перетину в робочу область проходить більше рідини ніж через отвори, які максимально віддалені від даного перетину, що негативно впливає на реалізацію гідродинамічного ефекту очищення. Досліджено еволюцію течії рідини біля отворів уздовж поверхні перфорованого циліндра в залежності від зміни параметрів  $Re_\phi$ ,  $Re_r$  та показано, що зі збільшенням  $Re_\phi$ , що характеризує обертовий рух рідини, збільшується перекриття отворів набігаючим потоком. У тривимірній постановці досліджено траєкторії руху завислих частинок біля проникної поверхні фільтроелемента, доведено здійснення гідродинамічного ефекту очищення для перфорованого циліндра в якості фільтроелемента при різних режимах течії та відмічено наявність «буферної зони», яка виключає контакт частинок домішки з поверхнею проникного циліндра.

На основі вісесиметричної постановки виявлено позитивний вплив обертання торцевої стінки фільтроелемента на гідродинаміку течії, що проявляється в стримуванні поширення вихрових зон з області бункера в робочу область фільтра, та утримання частинок у бункері. Отримано залежності ефективності очищення фільтра від відносного діаметру і густини частинок домішки та густини рідини при заданій конструкції фільтра. Визначено найвищу ефективність утримання частинок домішки в бункері циліндричної та конічної розбіжної форми.

Проведено експериментальні дослідження, що підтвердили ефективність, яка складає 95 %, запропонованого пристрою очищення рідини АМГ-10 від частинок розміром 100...200 мкм, та адекватність отриманих теоретичних результатів реальним фізичним процесам. Розбіжність між розрахунковими й отриманими в результаті експерименту значеннями порівнюваних параметрів склала не більше 9 %.

**Ключові слова:** повнопотоковий гідродинамічний фільтр, бункер для осаду, механічні частинки, математична модель, робочий процес, число Рейнольдса, робоча рідина.

## SUMMARY

**Brazhenko V. M. Cleaning of working fluids by a full-flow hydrodynamic filter with a rotating perforated cylinder and a sediment bunker.** – The manuscript.

The thesis is for the degree of a candidate of technical sciences in the specialty 05.05.17 – «Hydraulic machines and hydropneumatic units» – Sumy State University, Sumy, 2018.

In the thesis the actual scientific and technical problem is solved – an increase in the efficiency of cleaning of working fluids from mechanical particles by a full-flow hydrodynamic filter, namely a rotational, in which it is proposed to use a rotating perforated cylinder as a filter element and a sludge hopper for collecting the separated particles.

On the basis of numerical modeling based on the Navier-Stokes (RANS) averaged Reynolds equations using a shift model of the shifting stresses (SST  $k-\omega$  model) of Menter, a study of the flow of a carrier fluid near the rotating filtering surface and the area of the rotor sink hopper filter. The uneven flow of a fluid in a radial direction through a perforated cylinder is proved. Through the openings located near the inlet to the working area there is more fluid than through the openings, which are as far removed from this section, which adversely affects the implementation of the hydrodynamic effect of cleaning. The evolution of the fluid flow along the holes along the surface of the perforated cylinder, depending on the change in the parameters  $Re_\varphi$ ,  $Re_r$ , has been studied, and it is shown that with increasing  $Re_\varphi$ , which characterizes the rotary motion of the liquid, the overlapping of the apertures with the incident flow increases. In the three-dimensional form, the trajectories of the motion of suspended particles near the permeable surface of the filter element have been investigated, the hydrodynamic effect of purification for a perforated cylinder as a filter element has been proved under different flow regimes and the presence of a «buffer zone» is excluded, which excludes the contact of impurity particles with the penetrant cylinder surface.

On the basis of an axisymmetric statement, the positive effect of the rotation of the end wall of the filter element on the hydrodynamics of the current, revealed in the containment of the diffusion of vortex zones from the bunker region to the working region of the filter, and the content of the particles in the hopper, was found. The dependence of the filter cleaning efficiency on the relative diameter and density of the particles of impurity and fluid density on the given filter design was obtained. The highest efficiency of the content of impurity particles in the bunker of the cylindrical and conical divergent configuration is determined.

Experimental studies have been carried out to confirm the efficiency of 95 % of the proposed cleaning device from particles of 100...200  $\mu\text{m}$  AMG-10 fluid and the adequacy of the obtained theoretical results to real physical processes. The difference between the calculated values and the resulting parameters obtained by the experiment was not more than 9 %.

**Keywords:** full-flow hydrodynamic filter, sediment hopper, mechanical particles, mathematical model, working process, Reynolds number, working fluid.

Підп. до друку 24.04.2018. Формат 60x84/16. Папір офс.  
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,16. Обл.-вид. арк. 1,25.  
Тираж 100 пр. Замовлення № 53-1.

Видавець і виготівник  
Національний авіаційний університет  
03680. Київ – 58, проспект Космонавта Комарова, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002