

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ЛЯПОЩЕНКО ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 66.074.1

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ
ІНЕРЦІЙНО-ФІЛЬТРУЮЧОЇ СЕПАРАЦІЇ**

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Склабінський Всеволод Іванович,
Сумський державний університет, м. Суми,
завідувач кафедри процесів та обладнання
хімічних і нафтопереробних виробництв

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ульєв Леонід Михайлович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків,
професор кафедри інтегрованих технологій,
процесів та апаратів

доктор технічних наук, професор
Зав'ялов Володимир Леонідович,
Національний університет
харчових технологій, м. Київ,
завідувач кафедри процесів і апаратів
харчових виробництв

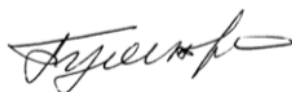
доктор технічних наук, професор
Вітенько Тетяна Миколаївна,
Тернопільський національний
технічний університет імені І.Пулюя, м. Тернопіль,
завідувач кафедри обладнання харчових технологій

Захист дисертації відбудеться “12” грудня 2016 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д35.052.09 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Степана Бандери, 12, головний корпус, ауд. 226.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розіслано “10” листопада 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор



Я.М.Гумницький

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Процеси сепарації фаз є супутніми при протіканні більшості з основних процесів хімічної технології в промислових машинах та апаратах, зокрема гідромеханічних (відстоювання, фільтрування, центрифугування, розділення та фракціонування, мокре очищення), теплових (випаровування та конденсація), масообмінних (абсорбція, ректифікація, екстракція, кристалізація).

Найбільшого поширення набули гравітаційно-інерційні сепаратори, основним недоліком яких є низький ступінь розділення, та фільтри, які відрізняються підвищеним гідравлічним опором та обмеженою продуктивністю. На підставі виявлених недоліків було визначено перспективні напрямки організації руху та взаємодії двофазних потоків, а в результаті розроблено новий клас інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв, які поєднують кращі переваги та дозволяють уникнути основних недоліків, притаманних окремим типам існуючих сепараційних пристроїв (відцентрових, насадкових, сітчастих, фільтрів). Так, застосовано спосіб відмінний від традиційного послідовного розташування сепараційних пристроїв різного типу для підвищення ефективності сепарації в цілому. Розташуванням фільтруючих елементів в зонах потенційного вторинного унесення з інерційних сепараційних каналів досягається зниження гідравлічного опору та підвищення ефективності сепарації у широких діапазонах навантажень та співвідношення фаз.

Дослідження процесів сепарації, в додаток ускладнених сполученим тепломасообміном, відноситься до фундаментальних проблем гідромеханіки, теорії процесів тепло- та масопередачі, оскільки на їх основі вирішуються інші наукові та технічні задачі, що виникають при розрахунках процесів та проектуванні обладнання хімічної технології. У зв'язку з цим можна стверджувати, що тема дисертації представляється актуальною, має важливе наукове і практичне значення, оскільки спрямована на вирішення актуальної науково-прикладної проблеми, сутність якої полягає в створенні теоретичних основ процесів інерційно-фільтруючої сепарації і науково обґрунтованих методів розрахунку основних технологічних параметрів та характеристик сепараційних пристроїв.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв Сумського державного університету (СумДУ) у відповідності до визначених пріоритетних напрямів розвитку науки й техніки на період до 2020 року (Закон України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», ст.3, п.1,3,4) та згідно з планом держбюджетних НДР СумДУ на 2007-2019 рр. за темами «Дослідження вихрових грануляційних та масотеплообмінних пристроїв», «Дослідження гідродинамічних та масотеплообмінних характеристик пристроїв з вихровими та високотурбулізованими одно- та двофазними потоками» та «Гідродинамічні показники двофазних потоків тепломасообмінного, грануляційного та сепараційного обладнання» (МОН України, ДР №0106U013012, №0110U002632, №0115U002551), відповідальним виконавцем яких є здобувач. Дисертаційна робота відповідає плану НДДКР ПАТ «Сумське НВО ім.М.В.Фрунзе» на 2009-2011 рр. за темою «Дослідження гідродинаміки багатофазних потоків при сепарації та фільтруванні, оптимізація конструкцій промислових сепараторів для нафтогазової та

хімічної промисловості». Наукові результати та практичні рекомендації дисертаційної роботи використані під час науково-технічного консультування, а наукові розробки впроваджені в рамках виконаних НДДКР та наданих інжинірингових послуг за госпдоговорами і міжнародними контрактами: №51.18-02.15.СП (ТОВ «Сумифітоформація»); №51.18-02.16.СП (ТОВ «Аліндастрі»); №51.18-04.12.СП (ПрАТ «Укргазвидобуток», Представництво «Регал Петролеум Корпорейшн Лімітед»); №51.21-01.13.СП (АТ «Сумський завод «Насосенергомаш», холдинг «Група ГМС»); №51.18-02.14.СП (ТОВ НПВ «Машхімнафтосервіс» (Україна, Республіка Гана); №3/04, №51.18-05.12.СП (ТОВ «Суми-Омекс», АО «НПАО«ВНИИкомпрессормаш», концерн «Укрросметал»); №51.18-05.15.СП (ТОВ «Агросервіс»); №51.18-04.15.СП (ПАТ «Укрхімпроект», ТюменьНІПНафта, Група «Лукойл»). Здобувач був і є науковим керівником вказаних госпдоговірних НДДКР в 2012-2016 рр.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розв'язання важливої науково-прикладної проблеми розробки теоретичних основ процесів інерційно-фільтруючої сепарації газодисперсних потоків, моделювання гідродинаміки інерційно-фільтруючих газосепараційних пристроїв та аналізу впливу сполученого тепломасообміну на процеси інерційно-фільтруючої сепарації газоконденсатних систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно послідовно розв'язати такі задачі:

- провести порівняльний аналіз сучасних методів розділення двофазних багатокомпонентних сумішей та обґрунтувати доцільність запровадження інерційно-фільтруючих способів для підвищення ефективності сепарації в апаратах з інтенсивними гідродинамічними режимами;

- сформулювати концептуальні основи теорії інерційно-фільтруючої сепарації, провести теоретичний аналіз основних механізмів вловлювання дисперсних часток інерційно-фільтруючими сепараційними елементами, встановити основні закономірності процесів інерційного захоплення краплин, їх осадження на волокна фільтруючого елемента та плівку вловленої рідини;

- створити фізичну модель та встановити закономірності гідродинамічних процесів при інерційно-фільтруючій сепарації газорідних систем, розробити методи розв'язання основних рівнянь гідродинаміки та математичного моделювання гідродинамічних процесів при інерційно-фільтруючій сепарації, виконати оптимізаційне гідродинамічне профілювання сепараційних каналів;

- визначити гідродинамічні та сепараційні характеристики інерційно-фільтруючих газосепараторів, перевірити адекватність та апробувати розроблені моделі, узагальнити результати теоретичних і експериментальних досліджень;

- обґрунтувати вибір волокнистих матеріалів для фільтруючих елементів, встановити закономірності вторинних процесів, які супроводжують основний процес інерційно-фільтруючої сепарації газодисперсних систем, визначити оптимальні режими відведення вловленої рідини для упередження вторинного бризкоунесення, зниження гідравлічного опору та підвищення ефективності сепарації, що є основою теоретичних розрахунків та прогнозування фракційної ефективності сепарації і загальної ефективності інерційно-фільтруючих газосепараторів у цілому;

- проаналізувати вплив сполученого міжфазового тепломасообміну на процеси інерційно-фільтруючої сепарації газоконденсатних сумішей;

- розробити нові способи інерційно-фільтруючої сепарації та конструкції сепараційних пристроїв і сепараторів, які дозволять підвищити ступінь розділення та знизити гідравлічний опір за рахунок уникнення негативного впливу вторинних процесів;

- розробити програму та методику дослідно-промислових випробувань нових інерційно-фільтруючих газосепараторів для блоків сепараційних установок, а також теоретично обґрунтованих практичних рекомендацій та інженерних методик для їх розрахунку і проектування;

- здійснити заходи щодо апробації та практичного використання (впровадження) отриманих наукових результатів і практичних рекомендацій, провести техніко-економічні розрахунки з оцінки доцільності пропонованих рішень.

Об'єктом дослідження є процеси сепарації газодисперсних систем та інерційно-фільтруюче сепараційне обладнання.

Предметом дослідження є гідродинаміка газодисперсних потоків в інерційно-фільтруючих сепараційних пристроях, вплив режимних і конструктивних параметрів на гідравлічний опір та ефективність сепарації.

Методи дослідження. Основні теоретичні положення дисертації ґрунтуються на фундаментальних положеннях механіки рідини та газу, класичних положеннях теорії гідродинаміки та тепломасообміну. Основні теоретичні залежності для сепараційних каналів та елементів інерційно-фільтруючих сепараторів визначено диференціальними методами математичного аналізу та інтегрального обчислення з застосуванням CAS-систем комп'ютерної алгебри. На емпіричному рівні наукових досліджень застосовано методи експериментальної гідродинаміки (аеродинамічне зондування, термоанемометрія, візуалізація методами димових струменів), прямого спостереження (мікроскопія), оптичні (світлорозсіювання, лазерної дифракції), оптичної мікрофотографії, цифрової програмної обробки мікрофотографій. Експериментальні дослідження проведено методами фізичних моделювань стендових моделей сепараційних пристроїв та дослідно-промислових зразків блочно-модульних сепараційних установок; аналізу, симуляції, оптимізації процесів та обладнання CFD-методами обчислювальної гідродинаміки, статичного та динамічного математичного моделювання хіміко-технологічних процесів (ХТП) на базі CAE-систем термодинамічного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень отримані такі наукові результати:

- вперше теоретично обґрунтовано можливість підвищення ефективності сепарації газорідинних систем шляхом створення апаратів, в яких поєднані принципи одночасної взаємодії інерційних та фільтруючих сепараційних елементів, на відміну від традиційно послідовної схеми розташування сепараційних пристроїв;

- вперше закладено теоретичні основи теорії інерційно-фільтруючої сепарації, які пояснюють основні механізми вловлювання краплин інерційно-фільтруючими сепараційними елементами і визначають основні закономірності процесів гравітаційного осадження та інерційного захоплення краплин, їх осадження на волокна фільтруючого елемента та плівку вловленої рідини;

- розвинуто науковий підхід до фізичного моделювання та теоретичних досліджень гідродинамічних процесів під час інерційно-фільтруючої сепарації газорідних систем, розробки методів розв'язання основних рівнянь гідродинаміки та математичного моделювання гідродинамічних процесів під час інерційно-фільтруючої сепарації;

- вперше отримано аналітичний розв'язок рівнянь руху і нерозривності потоку відносно складових локальних швидкостей газового потоку для окремого випадку плоскої невісесиметричної течії в криволінійному каналі зі стінками синусоїдального профілю;

- розширено уявлення про основні методи і механізми інерційно-фільтруючої сепарації, на підставі запропонованої фізичної моделі руху газокраплинних потоків в каналах інерційно-фільтруючих сепараторів, вперше отримано чисельне розв'язання рівнянь руху газодисперсного середовища, що дозволяє визначити траєкторії руху краплин і здійснити оптимізаційне геометричне профілювання криволінійних каналів з фільтруючими елементами;

- вперше визначено основні гідродинамічні характеристики сепараційних елементів інерційно-фільтруючих сепараторів за результатами експериментальних досліджень модельних зразків криволінійних сепараційних каналів;

- отримала подальший розвиток континуальна модель криволінійної течії газодисперсного потоку, що дозволяє розрахунковим методом визначити спосіб розподілу крапель за розмірами і відповідно оцінити ефективність сепарації після кожної послідовної криволінійної ділянки сепараційного каналу;

- науково розвинуто методику розрахунку газодинамічних сепараторів з метою підвищення ефективності сепарації та зниження гідравлічного опору з визначенням оптимальних конструктивних параметрів інерційно-фільтруючих сепараційних елементів.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновано окремий клас нових, захищених патентами, способів сепарації та нових конструкцій інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв. Розроблені наукові положення та практичні рекомендації використано при підготовці навчальних посібників «Технологічні основи нафто- та газопереробки», «Обладнання газо- та нафтопереробних виробництв». Результати досліджень використано науковцями кафедри комп'ютерних наук СумДУ при виконанні НДР «Багатовимірні системи управління технічними і технологічними об'єктами» (ДР №0113U004134). Розроблено програму та методику дослідно-промислових випробувань нових інерційно-фільтруючих газосепараторів, крапле- та тумановловлювачів для блоків сепараційних установок (для ПАТ «Укрнафта»), а також науково обґрунтовані практичні рекомендації та інженерні методики для їх розрахунку і проектування. Отримані наукові результати та практичні рекомендації впроваджені у виробництво на машинобудівних заводах, підприємствах хімічної промисловості і нафтогазового комплексу України та іноземних держав (ПАТ «Сумське НВО ім.М.В.Фрунзе», АТ «Сумський завод «Насосенергомаш», холдинг «Група ГМС», Група «Лукойл», концерн «Укрросметал», ПАТ «Укрхімпроект», ТОВ «Агросервіс», ТОВ «Суміфітоформація», ПрАТ «Укргазвидобуток», Представництво «Регал Петролеум Корпорейшн Лімітед» та інші).

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі стану проблеми, обґрунтуванні і розробленні основної ідеї і теми дисертації, розробленні наукових положень, програм та методик експериментальних досліджень і дослідно-промислових випробувань, узагальненні отриманих результатів і формулюванні висновків, розробці науково обґрунтованих практичних рекомендацій та інженерних методик розрахунку, впровадженні науково-технічних розробок. Здобувач висловлює глибоку подяку науковому консультанту д.т.н., професору Склабінському В.І. за надані консультації в розв'язанні наукової проблеми.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних наукових конференціях, конгресах, симпозіумах, школах-семінарах та виставках: «Стратегия качества в промышленности и образовании» (Болгарія, Варна, 2007, 2009, 2010, 2011, 2013 pp.); XI Ogólnopolska konferencja przeływów wielofazowych (Польща, Гданськ, 2015 p.); «Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии: Реактив-2010» (Білорусь, Мінськ, 2010 p.); «Прогрессивные технологии и процессы», «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» «Автоматизированное проектирование в машиностроении» (Російська Федерація, Курськ, Новокузнецьк, 2014 p.); «Удосконалення процесів та обладнання харчових і хімічних виробництв», «Проблеми енергетичної ефективності харчових і хімічних виробництв», «Сучасні напрями теоретичних і прикладних досліджень '2013», «Інноваційні енерготехнології» (Одеса, 2006, 2009, 2010, 2011, 2013, 2015 pp.); «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні», «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», «Хімія та хімічні технології: ССТ-2010, ССТ-2013» (Львів, 2009, 2010, 2013 p.); «Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи», «Нафтогазова енергетика – 2011», «Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу — ПМ-2016» (Івано-Франківськ, 2009, 2011, 2016 p.); «Хімія та сучасні технології» (Дніпропетровськ, 2007 p.); «Інноваційний потенціал української науки – ХХІ сторіччя» (Запоріжжя, 2011 p.); «Буріння» (Донецьк, 2012 p.); «Наукові дослідження – теорія та експеримент '2009», «Проблеми та перспективи розвитку нафтогазового комплексу» (Полтава, 2009, 2012 pp.); «Обчислювальний інтелект (ОІ-2013)» (Черкаси, 2013 p.); «Інтегровані технології і енергозбереження — ІТЕ-2014», «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2014 p.); «Методи дискретних особливостей в задачах математичної фізики — МДОЗМФ-2015» (Харків, Суми, 2015 p.); «Промислова гідравліка і пневматика» (Суми, Вінниця, 2015 p.); «Технології ХХІ століття» (Алушта, Суми, Глухів 2009, 2015 pp.); «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво» (Шостка, 2014 p.); «Сучасний український університет: теорія і практика впровадження інноваційних технологій», «Хімічна технологія: наука та виробництво», «Герметичність, вібронадійність і екологічна безпека насосного і компресорного устаткування — ГЕРВІКОН-НАСОСИ-2014», «Системи розробки та постановки продукції на виробництво», «Сучасні технології в промисловому виробництві» (Суми, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016 pp.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано у 70 наукових працях, з них одна публікація у колективній монографії, 20 статей у наукових фахових виданнях України та 12 публікацій у фахових видання іноземних держав, у тому числі одна публікація у електронному науковому фаховому виданні та 18 статей у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз (у тому числі 3 статті у виданнях, які обліковуються наукометричними базами Scopus та Web of Science), 27 публікацій у матеріалах та працях конференцій. Отримано 15 патентів на корисну модель, 2 патенти на винахід України, 1 міжнародний патент на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел з 425 найменувань, додатків. Повний обсяг дисертації становить 295 сторінок основного тексту, серед яких 5 таблиць, 92 ілюстрації, а також додатків на 90 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми досліджень, зв'язок з науковими програмами, сформульовані мета та задачі досліджень, наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, наведено основні дані щодо апробації роботи, публікацій, відомості про структуру та загальну характеристику дисертаційної роботи.

Перший розділ присвячений огляду й аналізу джерел літератури, які стосуються теоретичних і практичних проблем механіки суцільних середовищ та механіки дисперсних систем, а також процесів сепарації фаз в апаратах з інтенсивними гідродинамічними режимами.

У результаті доведено актуальність теми дисертаційних досліджень, виділено та поставлено наукову проблему, визначено мету роботи та поставлено основні задачі досліджень, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети.

У **другому розділі** обґрунтовано вибір напрямку досліджень, обрано методи вирішення поставлених задач досліджень, проведено їх порівняння з оцінкою похибок вимірювань та перевіркою адекватності результатів моделювань, розроблено загальну методику та стратегію проведення дисертаційних досліджень.

На етапі застосування диференціальних методів математичного аналізу та інтегральних обчислень, а саме алгебраїчного (не чисельного) розв'язку лінійних і деяких нелінійних диференціальних рівнянь, диференціювання в часткових та повних похідних, побудування графіків функцій і діаграм даних використано системи комп'ютерної алгебри (Computer Algebra System, CAS).

Для математичного імітаційного моделювання гідродинамічних процесів при інерційно-фільтруючій сепарації гетерогенних газодисперсних систем пропонується такий підхід, в якому досліджуваний об'єкт представляється таким, що складається з областей двох типів, які описуються у рамках дискретного і континуального підходів відповідно. При цьому континуальна частина середовища моделюється методами обчислювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics, CFD), а дискретна – методом рухливих клітинних автоматів (Movable Cellular Automata, MCA), який поєднує переваги метода класичних клітинних автоматів (Cellular Automata, CA) і метода дискретних елементів (Discrete Element Method, DEM).

На етапі експериментальних досліджень гідродинамічних процесів при інерційно-фільтруючій сепарації застосовано методи експериментальної гідродинаміки у сукупності з методами прямого спостереження. Для аеродинамічного зондування масштабних моделей криволінійних каналів (рис.1) використовувались пневмонасадки та кульовий 5-канальний аеродинамічний зонд. Тарування застосовуваних аналогових контрольно-вимірювальних приладів здійснено методами термодинамічної метрології. Для вивчення на

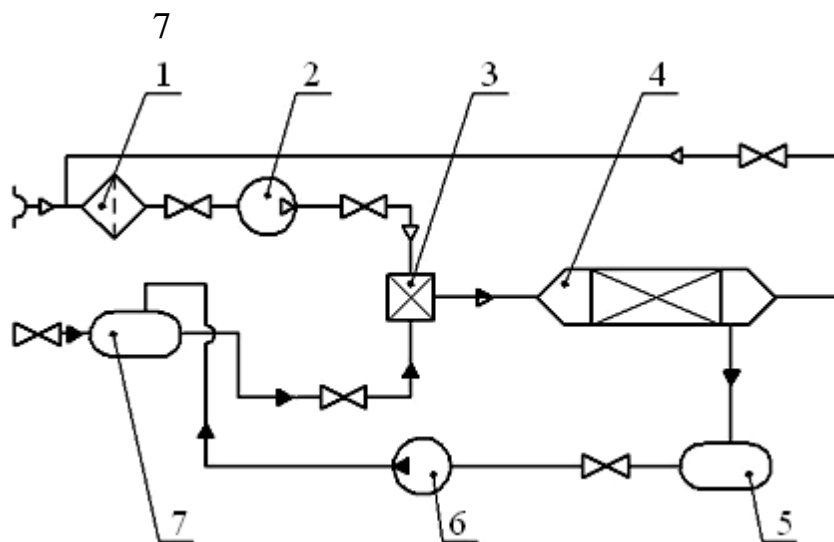


Рис.1. Експериментальна установка з дослідження розподілу швидкостей та ефективності сепарації в інерційно-фільтруючому криволінійному каналі:

- 1 – фільтр; 2 – повітродувка; 3 – змішувальна камера; 4 – модель криволінійного інерційно-фільтруючого сепараційного каналу; 5,7 – ємність; 6 – насос

масштабних моделях інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв характеру обтікання криволінійних поверхонь та візуалізації складних полів руху газодисперсних потоків з метою оптимізаційного гідродинамічного профілювання застосовано різні методи візуалізації (метод димових струменів, комп'ютерної візуалізації CFD-методами). Основними методами дисперсного аналізу досліджуваних гетерогенних систем обрано методи прямого спостереження (мікроскопія), оптичні методи (світлорозсіювання, лазерна дифракція, оптична мікрофотографія). При цьому використовувалися прилади: мікроскопи МПБ-2 (24x збільшення (2x збільшення об'єктиву, 12x збільшення окуляра) та МБУ-4 (збільшення від 56x до 300x); портативний квантово-оптичний генератор когерентних і монохроматичних електромагнітних хвиль видимого діапазону у вигляді вузьконаправленого променя (довжина хвилі 630-680 нм, потужність 2 мВт, червоний лазерний діод). У відповідності до розробленої методики прогнозування та оцінки розрахункової ефективності сепарації дисперсних систем визначено, що повна ефективність вловлювання дисперсних частинок в сепараційному пристрої може бути прирівняна до значення інтеграла вірогідності функції нормального розподілу частинок за розмірами. На етапі експериментальних досліджень з оцінки ефективності сепарації, кількісний аналіз вологовмісту здійснено конденсаційним методом з вимірюванням температури точки роси сепарованого газу переносними (портативними) та стаціонарними конденсаційно-термометричними цифровими гігрометрами серії «ТОРОС-3» (діапазон вимірювання температури точки роси від -55 до +90 °С; абсолютна похибка вимірювань, не більше $\pm 0,5$ °С). Експериментальні дослідження проведено у відповідності до оригінальних методик визначення гідродинамічних характеристик шляхом фізичних моделювань стендових моделей окремих криволінійних каналів, інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв і масштабних моделей інерційно-фільтруючих сепараторів.

Розроблено та виготовлено дослідно-демонстраційний стенд (рис.2) з дослідження процесів сепарації, оптимізації конструкцій сепараційних вузлів, оснащений термоанемометричним датчиком масової витрати повітря BOSCH HLM2-4.7 0280212014 (FE1-1, діапазон вимірювання витрати повітря 0-500 кг/годину); цифровим датчиком температури Dallas Semiconductor DS18B20 (TE5-1, діапазон вимірювання температури $-55...+125$ °C, точність $\pm 0,5$ °C, з програмованою роздільною здатністю перетворення); датчиком температури та вологості DHT22 (ME3-1,3-2, діапазон вимірювання вологості 0%...100%, точність $\pm 2\%$, діапазон вимірювання температури $-40...+125$ °C, точність $\pm 0,5$ °C);

силіконовим п'єзорезистивним датчиком тиску Freescale Semiconductor MPX2200 (PE4-1,4-2,4-3, діапазон вимірювання тиску 0-200 кПа), ультразвуковим датчиком вимірювання відстані (рівнемір) HC-SR04 (LE2-1,2-2,2-3, діапазон вимірювання відстані 2 см - 500 см, роздільна здатність - 0,3 см). Розроблено стенд (рис.3) для проведення приймальних випробувань дослідно-промислових зразків сепараційного обладнання (замовник – ПАТ «Сумське НВО ім.М.В.Фрунзе»).

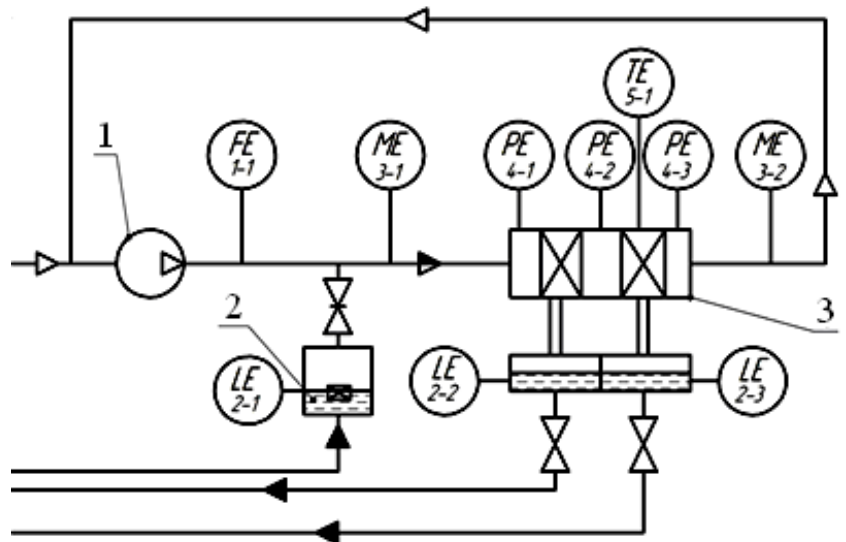


Рис.2. Дослідно-демонстраційний стенд з дослідження процесів сепарації газорідних потоків та конструкцій сепараційних вузлів: 1 – повітродувка; 2 – генератор туману; 3 – модель блочного інерційно-фільтруючого сепаратора

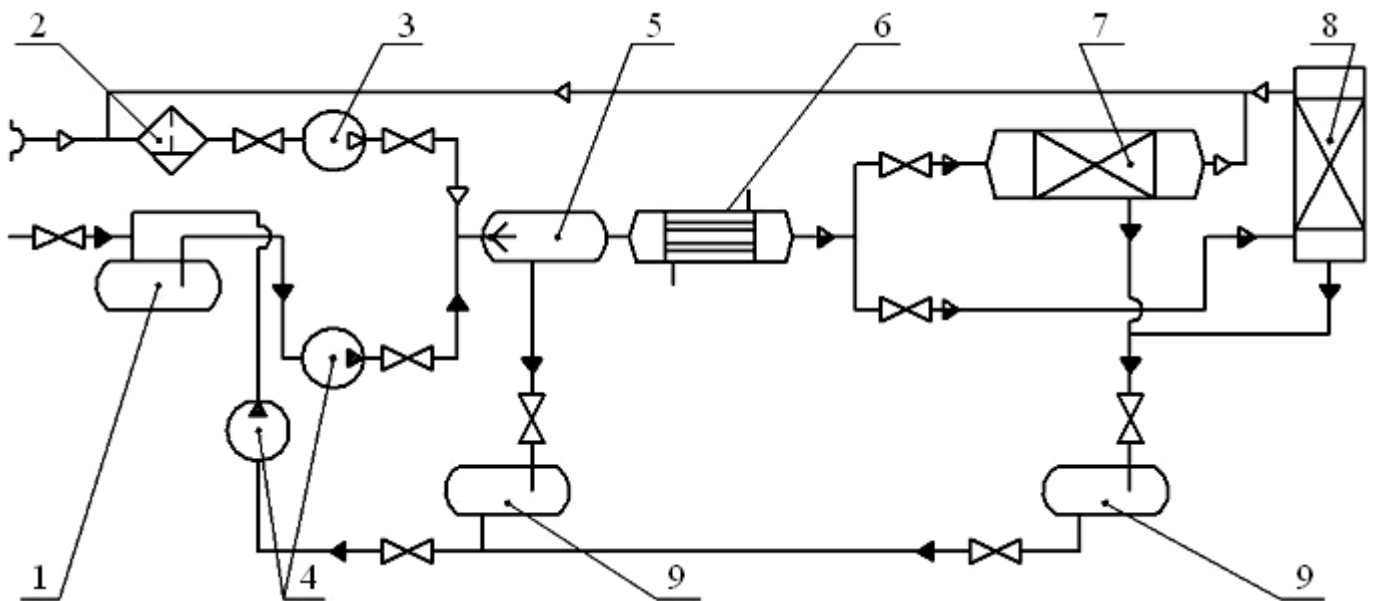


Рис.3. Схема стенду для проведення приймальних випробувань дослідно-промислових зразків сепараційного обладнання:

1,9 – ємність; 2 – фільтр; 3 – компресор; 4 – циркуляційний насос; 5 – змішувальна камера; 6 – теплообмінник; 7, 8 – комбіновані інерційно-фільтруючі сепаратори

У третьому розділі сформульовано концепцію та теоретичні основи теорії інерційно-фільтруючої сепарації, що представляє собою сукупність узагальнених наукових положень, які пояснюють фізичні явища (ефекти) та гідродинамічні основи процесів інерційно-фільтруючої сепарації, основні закономірності руху і взаємодії суцільної та дисперсної фаз в криволінійних каналах. При цьому розглядаються теоретичні методи моделювання гідромеханічних процесів, що складають внутрішню (рух несучої фази по вузьких каналах, стікання падаючої плівки вловленої рідини по стінках сепараційних каналів та у зазорах між подвійними жалюзями), зовнішню (гравітаційне та інерційне осадження) та змішану (фільтрування) задачі гідродинаміки у процесах розділення (сепарації) двохфазних гетерогенних дисперсних систем, а також у випадках, ускладнених вторинними процесами, які супроводжують основний процес інерційно-фільтруючої сепарації.

Модель руху суцільної фази в криволінійних сепараційних каналах базується на фундаментальних фізичних законах збереження (закон збереження енергії, маси та імпульсу), які в даному випадку описуються системою диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса в приватних похідних, що об'єднують рівняння руху (1) та рівняння нерозривності (2). При цьому

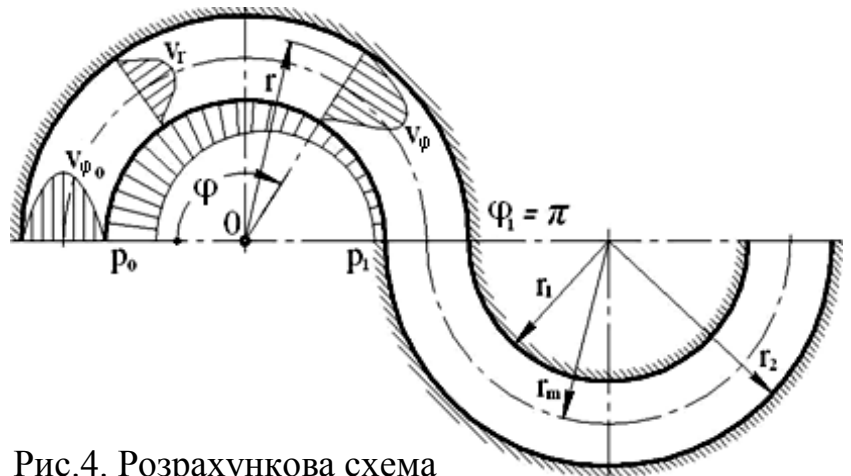


Рис.4. Розрахункова схема криволінійного сепараційного каналу

прийняті наступні спрощення і припущення: розглядається плоска течія уздовж криволінійного каналу синусоїдального профілю, а стінки мають постійні внутрішній r_1 і зовнішній r_2 радіуси (рівняння Нав'є-Стокса складаються в двовірному просторі в полярній системі координат, рис.4); перетікання, а також зміна полів швидкостей і тиску по висоті каналу незначні в порівнянні з аналогічними параметрами по довжині каналу; зміна величини тиску по ширині каналу є несуттєвою внаслідок малої ширини каналу, а істотна зміна величини тиску відбувається по довжині каналу, при цьому криволінійна течія в'язкого потоку супроводжується процесом перетворення механічної енергії потоку з потенційної (тиск) в кінетичну і зворотно; течія газового потоку ізотермічна, модель турбулентності заснована на гіпотезі турбулентної в'язкості Буссінеска, процес розглядається усталений, задача вирішується стаціонарна.

$$\begin{cases} v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} - \frac{v_\phi^2}{r} = \varepsilon \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \phi^2} - \frac{v_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} \right); \\ v_r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} - \frac{v_\phi v_r}{r} = -\frac{1}{\rho r} \frac{dp}{d\phi} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 v_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\phi}{\partial \phi^2} - \frac{v_\phi}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} \right) \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + \frac{v_r}{r} = 0, \quad (2)$$

Вирішуючи рівняння (1) та (2) за допомогою поліномів припускаємо, що окружна швидкість газового потоку змінюється за квадратичною залежністю:

$$v_{\varphi}(r,\varphi)=Ar^2+Br+N+C\varphi^2+F\varphi+M\varphi r, \quad (3)$$

задовільняємо граничні умови (з умови не перетікання крізь стінки, обмежені радіусами r_1 та r_2 , що обмежують канал шириною $t_k=r_2-r_1$, $v_{\varphi}|_{r=r_1}=0$ та $v_{\varphi}|_{r=r_2}=0$, а на вході ($\varphi=0$) і на середньому радіусі ($r_m=(r_1+r_2)/2$) в ядрі потоку припускається, що швидкість дорівнює деякій величині $v_{\varphi}=X$), звідки отримуємо наступні значення коефіцієнтів розкладання:

$$A = -4X/t_k^2, \quad B = 8Xr_m/t_k^2, \quad N = -4Xr_1r_2/t_k^2. \quad (4)$$

Підставляючи отримані коефіцієнти у вираз (3) для окружної швидкості, в результаті розв'язання рівняння нерозривності (2) визначається радіальна швидкість

$$v_r = \frac{C_1}{r} - 2C\varphi - \frac{1}{2}Mr - F. \quad (5)$$

З урахуванням граничних умов (умови не перетікання крізь стінки, обмежені радіусами r_1 та r_2 : $v_r|_{r=r_1}=0$ та $v_r|_{r=r_2}=0$) визначаються коефіцієнти

$$C_1 = \frac{r_1}{2}(4C\varphi + Mr_1 + 2F), \quad C = -\frac{Mr_m + F}{2\varphi}, \quad F = -\frac{3}{2}M\left(r_2 - \frac{r_1}{3}\right). \quad (6)$$

Припускаючи, що окружна складова швидкості визначає умовну витрату газу між стінками в плоскому каналі

$$V = \int_{r_1}^{r_2} v_{\varphi} dr, \quad (7)$$

отримуємо вираз для величини X :

$$X = \frac{3}{2t_k} \left(\frac{Mt_k^2}{2} - V \right). \quad (8)$$

З припущення, що відстань між стінками каналу незначна ($t_k \ll r_m$), нехтуючи радіальним градієнтом тиску, а також використовуючи отримані залежності для окружної і радіальної складових швидкості, рівняння (1) дозволяють послідовно визначити залежності для параметра $M=M(V,\varphi,r)$ і окружний градієнт тиску, $\partial p/\partial \varphi$. Подальше інтегрування призводить до досить громіздких виразів для визначення розподілу тиску по довжині каналу $p(\varphi)$, а також до залежності витрати газу V через повний перепад тиску Δp .

Спосіб розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса, описаний вище (поліноміальне рішення), враховує обмежене число членів розкладання (3), які спочатку не залежать від параметрів φ , r . Вирази для параметрів C_1 , C , F , M , які залежать від φ , r слід розуміти як отримані в першому наближенні.

Було також розглянуто інший більш загальний спосіб розв'язання рівнянь (1) та (2) із застосуванням модифікованих степеневих рядів.

Функцію розподілу радіальної складової швидкості представимо у вигляді нескінченного ряду

$$v_r = \sum_{i=2}^{\infty} \frac{dA_i(\varphi)}{d\varphi} f_i(r) \equiv \sum_{i=2}^{\infty} A_i' f_i(r), \quad (9)$$

в якому підлягають визначенню сімейство функцій $A_i(\varphi)$, що задовольняють граничним умовам $A_i(r_1)=A_i(r_2)=0$ та лінійно незалежні функції $f_i(r)$, що задовольняють граничним умовам $f_i(r_1)=f_i(r_2)=0$, які приймаються у вигляді $f_i(r)=(r-r_1)^i(r-r_2)^i$.

Підстановка виразу (9) в рівняння нерозривності (2) після інтегрування дозволяє представити окружну складову швидкості у виразі:

$$v_\varphi = V\beta(r) + \sum_{i=2}^{\infty} A_i(\varphi)\psi_i(r), \quad (10)$$

в якому функція витрати $\beta(r)=6f_1(r)/(t_\kappa^2)$, задовольняє граничним умовам $\beta(r_1)=\beta(r_2)=0$, а функції розподілу $\psi_i(r)=1+\frac{2ir(r-r_m)}{(r-r_1)(r-r_2)}$.

Внаслідок $t_\kappa \ll r_m$ здійснимо осереднення рівнянь з системи (1) по радіальному проміжку:

$$V \sum_{i=2}^{\infty} \xi_{1i} A_i'' - 2V \sum_{i=2}^{\infty} \xi_{2i} A_i = \kappa_1 V^2 - \varepsilon \sum_{i=2}^{\infty} \gamma_{1i} (3A_i' - A_i'''), \quad (11)$$

$$\frac{dp}{d\varphi} = -\frac{\rho}{t_\kappa} \left[\sum_{i=2}^{\infty} \xi_{1i} A_i' + \varepsilon(\kappa_2 + \kappa_3) \right] V + \varepsilon \left[\sum_{i=2}^{\infty} (\gamma_{2i} - \gamma_{1i}) A_i + 3 \sum_{i=2}^{\infty} \gamma_{1i} A_i'' \right]. \quad (12)$$

Коефіцієнти, що входять у рівняння (11), (12) є коефіцієнтами витрати

$$\kappa_1 = \int_{r_1}^{r_2} \beta_i^2 dr, \quad \kappa_2 = \int_{r_1}^{r_2} r \beta_i'' dr, \quad \kappa_3 = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\beta}{r} dr; \quad \text{конвективних сил інерції} \quad \xi_{1i} = \int_{r_1}^{r_2} \beta f_i dr,$$

$$\xi_{2i} = \int_{r_1}^{r_2} \beta f_i \psi_i dr; \quad \text{сил тертя} \quad \gamma_{1i} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{f_i}{r} dr, \quad \gamma_{2i} = \int_{r_1}^{r_2} r (f_i \psi_i)'' dr.$$

Слід зазначити, що ці коефіцієнти набувають нульових значень при $i \geq 3$, а для $i=2$ поле швидкостей визначається компонентами:

$$v_\varphi = \beta V + A f \psi; \quad (13)$$

$$v_r = A' f, \quad (14)$$

а рівняння (11) набуває форми лінійного однорідного диференціального рівняння третього порядку $A''' - \theta A'' - 3A' + \kappa^2 \theta A = -\sigma$ відносно пошукової функції $A(\varphi)$ з

$$\text{постійними коефіцієнтами} \quad \theta = \frac{\xi_1 V}{\varepsilon \gamma_1}, \quad \kappa = \sqrt{\frac{2\xi_2}{\xi_1}}, \quad \sigma = \frac{\kappa_1 V^2}{\varepsilon \gamma_1}, \quad \text{загальне розв'язання якого}$$

$$A(\varphi) = \sum_{\kappa=1}^3 C_\kappa e^{\lambda_\kappa \varphi} - \frac{\sigma}{\kappa^2 \theta} \quad \text{містить корені} \quad \lambda_\kappa \quad \text{характеристичного рівняння}$$

$\lambda^3 - \theta \lambda^2 - 3\lambda + \kappa^2 \theta = 0$. Постійні інтегрування C_κ визначаються з умов: $A'(0)=0$ – відсутність радіальної швидкості у вхідному перетині; $A(0)=0$ – гіпотеза

початкового профілю окружної швидкості; $\lim_{\varphi \rightarrow \infty} \frac{A(\varphi)}{\varphi} = \text{const}$ – припущення про

обмеження градієнта швидкості.

Інтегрування рівняння (12) призводить до виразу для розподілу тиску в окружному напрямку $p(\varphi)$ при відомому тиску на вході p_0 :

$$p(\varphi) = p_0 - \frac{\rho\varphi_1}{t_k} \sum_{k=1}^3 a_k V^k, \quad (15)$$

при чому кут φ_1 визначає перетин на виході з каналу ($p(\varphi_1)=p_1$, рис.4), а коефіцієнти опору a_k визначаються як

$$a_1 = \kappa_2 + \kappa_3, \quad a_2 = 0, \quad a_3 = \frac{\xi_1 \kappa_1}{3\epsilon\gamma_1}.$$

Розв'язком рівнянь отримано залежність зміни тиску (гідрравлічний опір) Δp по довжині криволінійного сепараційного каналу (рис.5), а також розподіл окружної (тангенціальної) v_φ і радіальної (нормальної) v_r складових компонент швидкості руху газового потоку по ширині криволінійного сепараційного каналу (рис.6).

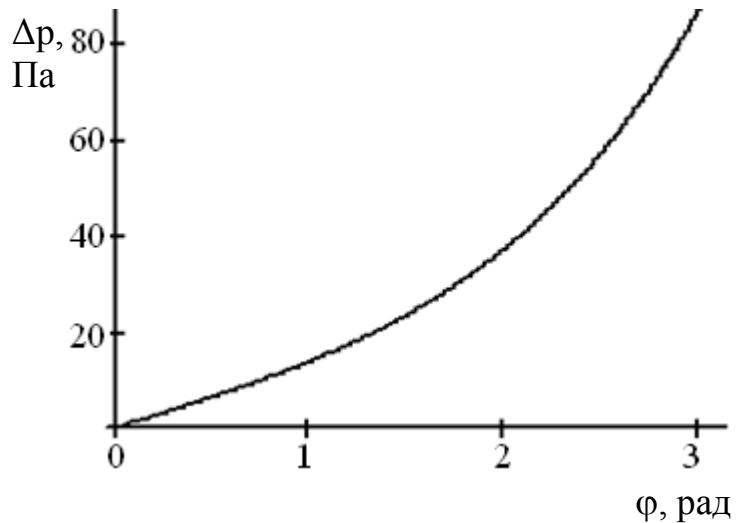


Рис.5. Залежність зміни тиску Δp по довжині криволінійного сепараційного каналу

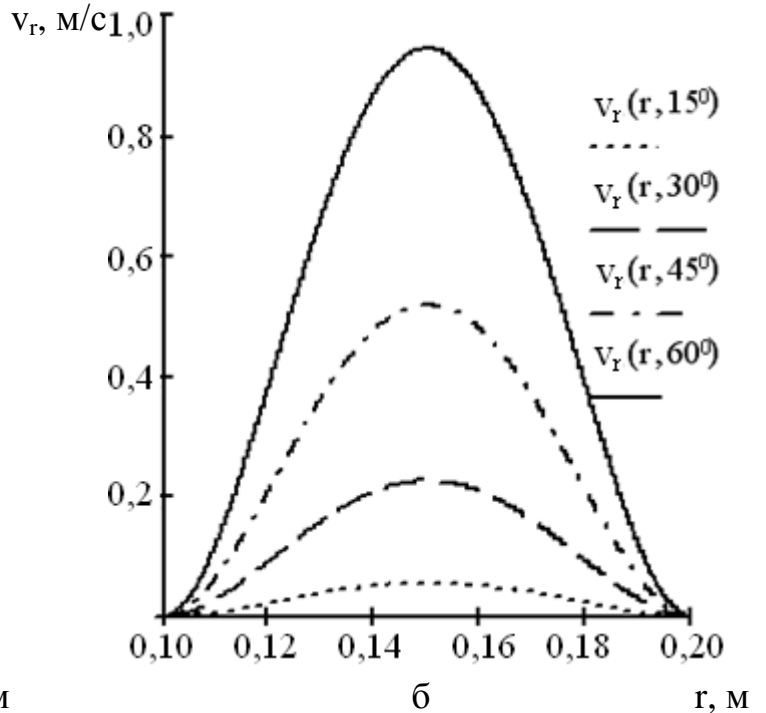
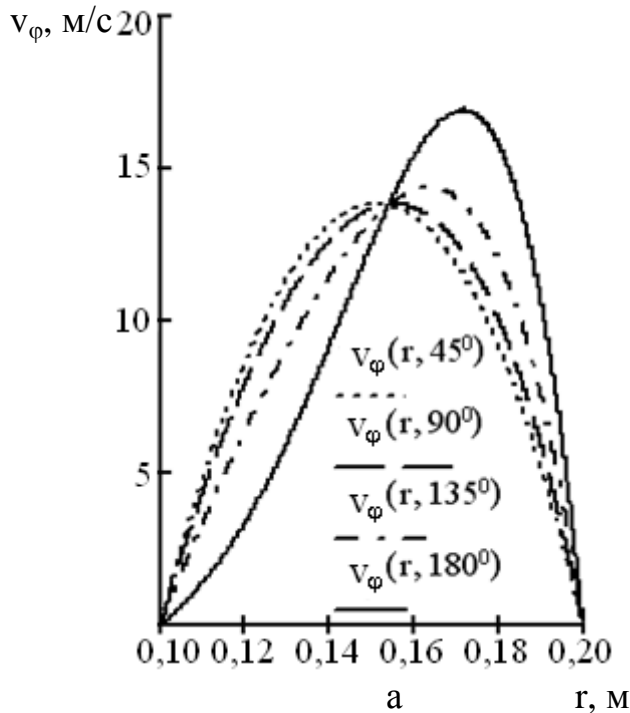


Рис.6. Розподіл окружної v_φ (а) і радіальної v_r (б) складових швидкості руху потоку по криволінійному каналу

Модель руху дисперсних часток з газовим потоком в криволінійних сепараційних каналах базується на фундаментальних фізичних законах класичної механіки (законах Ньютона), що в даному випадку описуються диференціальними рівняннями руху (16), які прогнозують поведінку та визначають траєкторії руху часток в зоні сепарації. При цьому прийняті ті ж спрощення та припущення, що і для моделювання руху газового потоку, а також додаткові: на вході криволінійний сепараційний канал швидкість суцільної фази (газовий потік) та дисперсних часток (краплі рідини) є однаковими; концентрація дисперсної фази незначна, середня

відстань між краплями порівняно велика по відношенню до їх розмірів, тому припускається, що вони не зтикаються та не коагулюють, а відповідно взаємодією між краплями рідини та їх впливом на турбулентні характеристики газового потоку можна знехтувати; розміри дисперсних часток (краплин туману) порівняно малі по відношенню до масштабу турбулентних пульсацій, тому вплив турбулентних пульсацій потоку на осереднений рух часток не враховується, а подрібнення краплин не відбувається; газокраплинна суміш є монодисперсною, краплі мають форму кулі, а густина рідини є постійною; силові поля негідродинамічної природи (електростатичні, магнітні та інші, за виключенням сили тяжіння) в зоні сепарації відсутні; вплив сили Магнуса-Жуковського, що діє на краплю внаслідок обертання, на осереднений рух краплин не враховується; вплив нестационарності відносного руху краплі на її траєкторію не враховується, процес розглядається установлений, задача вирішується стаціонарна.

$$\begin{cases} \frac{dw_r}{dt} = \frac{w_\varphi^2}{r} + C_D \frac{\pi \mu d_m}{8m} (v_r - w_r), \\ \frac{dw_\varphi}{dt} = -\frac{w_r w_\varphi}{r} + C_D \frac{\pi \mu d_m}{8m} (v_\varphi - w_\varphi). \end{cases} \quad (16)$$

Розв'язуючи стаціонарну задачу (виключаючи складові по часу) окружна складова швидкості краплі виражається з другого рівняння системи (16):

$$w_\varphi = \frac{C_D \frac{\pi \mu d_m}{8m} v_\varphi}{C_D \frac{\pi \mu d_m}{8m} + \frac{w_r}{r}}, \quad (17)$$

а отриманий вираз підставляється в перше рівняння системи (16), після розв'язання якого отримано два комплексно-сполучених розв'язки і один в області дійсних чисел:

$$w_r^3 + \left(2C_D \frac{\pi \mu d_m}{8m} r - v_r \right) w_r^2 + C_D \frac{\pi \mu d_m}{8m} r \left(C_D \frac{\pi \mu d_m}{8m} r - 2v_r \right) w_r - C_D \frac{\pi \mu d_m}{8m} r \left(v_\varphi^2 + C_D \frac{\pi \mu d_m}{8m} r v_r \right) = 0. \quad (18)$$

В результаті може бути отримано розподіл полів окружної w_φ і радіальної w_r складових швидкості руху часток (краплин), що рухаються з газовим потоком в зоні сепарації по перетину криволінійного сепараційного каналу (рис.7).

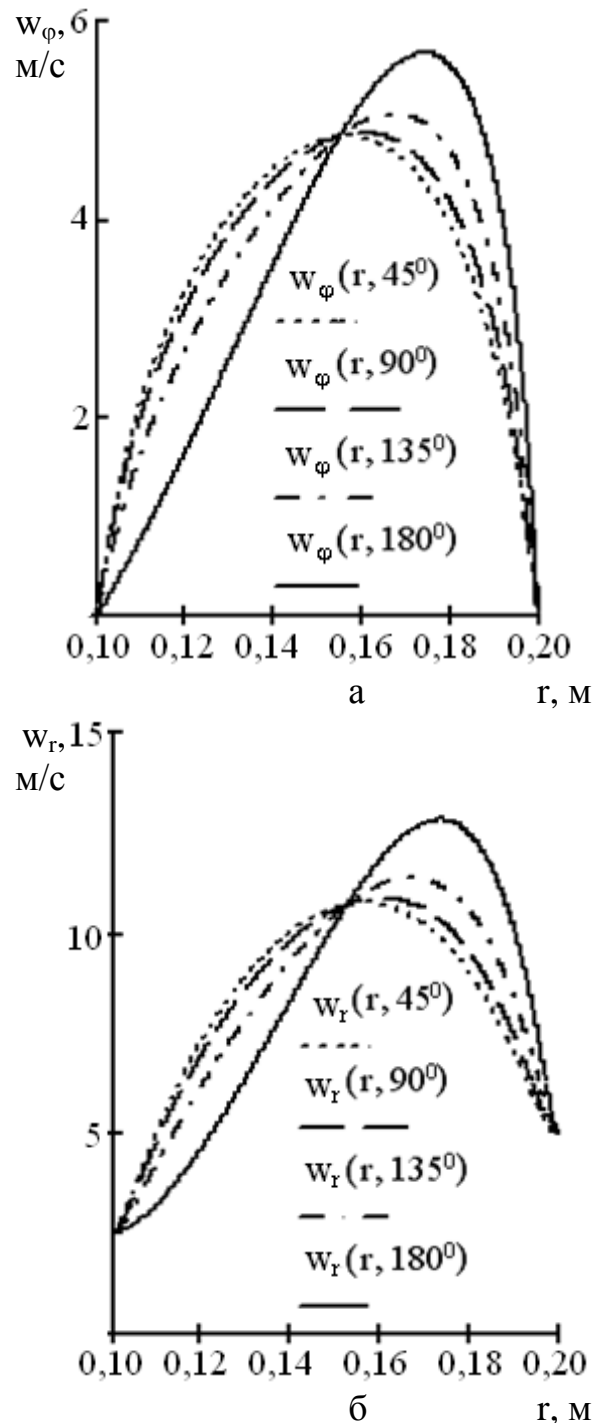


Рис.7. Розподіл окружної w_φ (а) і радіальної w_r (б) складових швидкості руху краплин в криволінійному сепараційному каналі

Розроблена модель руху газодисперсного потоку в криволінійних сепараційних каналах дозволяє отримати поля розподілу швидкостей руху суцільної несучої фази та дисперсних часток, які визначають лінії плинину потоку газу та траєкторії руху краплин рідини в інерційній сепараційній зоні. Краплі рідини, що рухаються з газовим потоком в полі гравітаційних та відцентрових сил, і досягають стінок криволінійних каналів в місцях перетину траєкторій руху краплин з кордонами каналів осаджуються на поверхні стінок з утворенням плівки вловленої рідини, яка вільно стікає.

Модель руху сепарованої рідини в плівці, яка стікає по вертикальній стінці сепараційного каналу в полі сили тяжіння, базується на рівняннях Нав'є-Стокса, що об'єднують рівняння руху та нерозривності, а саме розв'язання в такій постановці задачі є класичним і визначає характерний параболічний розподіл швидкостей у перетині потоку в плівці, а також дозволяє оцінити товщину плівки рідини (рис.8), яка прямопропорційна в'язкості рідини та масовій витраті рідини на одиницю ширини плівки і зворотно пропорційна густині рідини. Врахування ж взаємодії плівки рідини, що стікає по стінці, з газовим потоком, який рухається по сепараційному каналу, передбачає розв'язання крайової задачі:

$$\mu_L \frac{d^2 w}{dz^2} = g(\rho - \rho_L) = -g\varphi_G(\rho_L - \rho_G). \quad (19)$$

При цьому прийняті наступні спрощення і припущення: розглядається усталений рух ізотермічного потоку в'язкої нестискуваної рідини в плівці за відсутності хвилеутворення на поверхні плівки; в наближенні до теорії пограничного шару припускається товщина плівки малою у порівнянні з її протяжністю ($\delta \ll L$), плівка рідини постійна за товщиною (середньо-геометрична товщина $\delta = \text{const}$), утворюється на обох стінках ділянок сепараційного каналу; при визначенні швидкості плівки рідини розглядається середній перетин по висоті каналу (рис.8).

З урахуванням граничних умов, що визначають внутрішню тертя в плівці рідини, міжфазне тертя на поверхні плівки $\tau|_{z=t_p/2} = \mu_L (dw/dz)|_{z=t_p/2}$, отримане з рішення зовнішньої задачі, і умови $w|_{z=t_k/2} = 0$ прилипання рідини на вертикальній стінці каналу, в результаті розв'язання крайової задачі (19), виходячи з балансу сил, що діють в потоках, отримано залежності для визначення швидкості стікання рідини (в плівці, на поверхні плівки і середньої) та кутів відхилення векторів швидкостей потоків рідини і газу, внаслідок їх взаємодії:

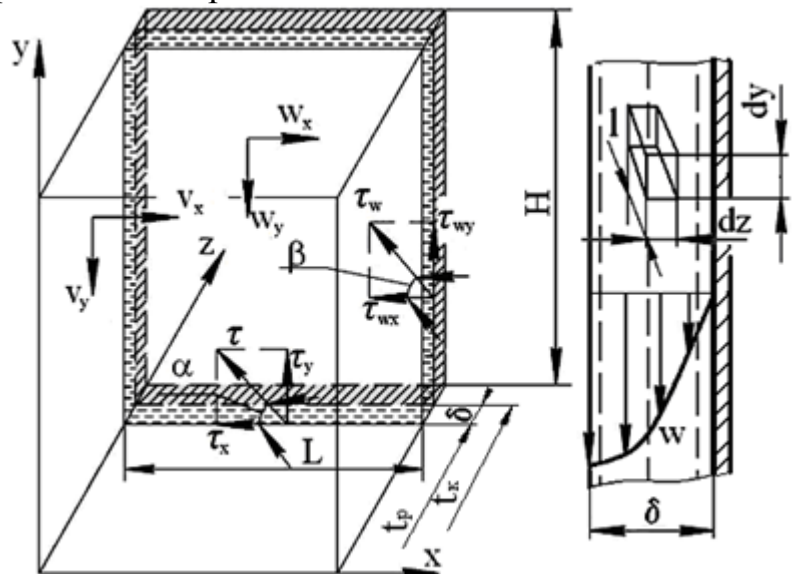


Рис.8. Розрахункова схема взаємодії газу краплинного потоку і плівки рідини, яка стікає по стінці сепараційного каналу

$$w = \frac{\tau}{\mu_L} \left(z - \frac{t_k}{2} \right) - \frac{g\varphi(\rho_L - \rho_G)}{2\mu_L} \left(z - \frac{t_k}{2} \right) \left(z - t_p + \frac{t_k}{2} \right), \quad (20)$$

$$w|_{z=t_p/2} = -\frac{\tau\delta}{\mu_G} - \frac{g\varphi(\rho_L - \rho_G)(2t_p t_k - t_p^2 - t_k^2)}{8\mu_L}, \quad (21)$$

$$w = \frac{1}{\delta} \int_{t_p/2}^{t_k/2} w dz = \frac{\tau\delta}{2\mu_L} + \frac{g\varphi(\rho_L - \rho_G)\delta^2}{6\mu_L}, \quad (22)$$

$$\cos\alpha = \frac{\tau_w \cos\beta}{\delta(2\tau/t_p - \tau/\delta)}, \quad \sin\beta = \frac{2\rho_L g\delta - \rho g t_p}{-2\tau_w}. \quad (23)$$

При розробці математичної моделі розподілу та міграції рідини в нескінченно малому елементі (рис.9) шару фільтру (модель плинущої у волокнистому середовищі) прийнято наступні спрощення та припущення: фільтр-елементи працюють в режимі самоочищення, процес стаціонарний ($\Delta p(t) = \text{const}$); розподіл рідини по висоті фільтруючого шару в межах елементарного елемента волокнистого фільтру рівномірний, структура волокнистого матеріалу регулярна анізотропна; товщина шару фільтруючих елементів незначна в порівнянні з шириною криволінійного сепараційного каналу ($\delta_\phi \ll t_k$, рис.9); в області фільтруючих елементів вся рідина стікає під дією сили тяжіння крізь шар фільтру; модель фільтрації ізотермічна, базується на диференціальному рівнянні нерозривності в приватних похідних, яке витікає з балансу маси речовини у довільному об'ємі dV пористого середовища та рівнянні закону фільтрації у відповідності до закону Дарсі і задається системою рівнянь в проекціях на циліндричну систему координат (рис.9):

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0, \\ u_r = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}, u_\varphi = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial \varphi}, u_z = \frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \right). \end{cases} \quad (24)$$

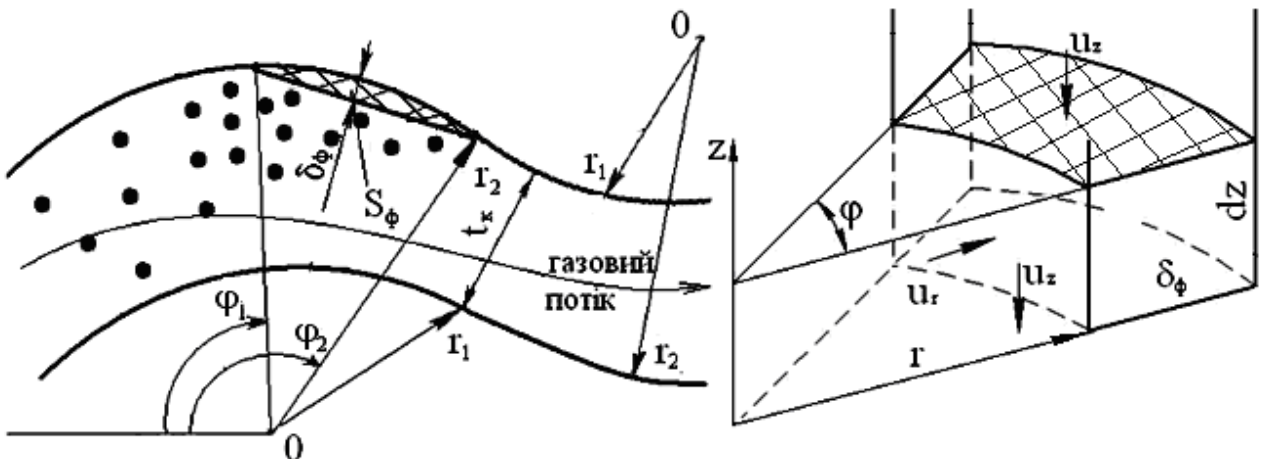


Рис.9. Розрахункова схема тонкошарового фільтруючого елемента на криволінійній ділянці сепараційного каналу

У відповідності до прийнятої схеми руху рідини у нескінченно малому елементі шару волокнистого фільтру (рис.9) та з умови неперетікання крізь бокові

грані з сусідніх елементів внаслідок анізотропності матеріалу волокнистого фільтру $\partial p / \partial \varphi = 0$, а, відповідно, $p = p(r, z)$, $u_\varphi = 0$, $u_r = u(z)$, $u_z = u(r, z)$. В умовах усталеного процесу для випадку безнапірного фільтраційного руху нестисливої рідини з вільною поверхнею тиск у верхніх шарах волокнистого фільтр-елементу та на його поверхні з боку каналу постійний та дорівнює тиску в інерційно-фільтруючому сепараційному каналі p_r , а тиск в плівці рідини вздовж вісі z (по висоті шару фільтру) розподіляється по гідростатичному закону $p = p_r + \rho g z$. Виходячи з припущення про лінійну залежність зміни тиску p в напрямку вздовж вісі r (в плівці рідини по товщині шару фільтру), граничних умов в плівці рідини на стінці каналу ($p|_{r=r_2} = p_r + \rho g z$) та поверхні розмежування фаз ($p|_{r=r_2-\delta} = p_r$ на вільній поверхні «висачування» сепарованої рідини) в шарі фільтру, визначається залежність для розподілу тиску $p(r, z)$ в плівці сепарованої рідини товщиною $\delta(z)$ (в шарі фільтру на висоті z ($\delta(z) = r_2 - r$), а система рівнянь (24) матиме вигляд:

$$p(r, z) = p_r + \rho g z \left(1 - \frac{r_2 - r}{\delta(z)} \right), \quad (25)$$

$$u_r(z) = \frac{k}{\mu} \frac{\rho g z}{\delta(z)}, \quad u_z(r, z) = \frac{k}{\mu} \rho g \left(1 - \frac{r_2 - r}{\delta(z)} + z(r_2 - r) \frac{d\delta(z)/dz}{\delta^2(z)} \right). \quad (26)$$

З рівняння витрати для кількості краплинної рідини, що потрапляє в шар фільтру з криволінійного сепараційного каналу, та кількості сепарованої рідини, що плівкою стікає з вище розташованих шарів фільтру отримано залежність для визначення необхідної висоти розташування переливних жолобів для відведення сепарованої рідини з інерційно-фільтруючих до дренажних каналів, виходячи з граничної умови, коли шар волокнистого фільтру повністю насичується плівкою вловленої рідини ($\delta(z) = \delta_\phi$) на відповідній висоті ($z = h$):

$$h = \sqrt{\frac{\mu}{k} \frac{q_r}{\rho^2 g r \varphi_G} \left(2 - \frac{\mu}{k \rho g} u_z \right) \delta_\phi}. \quad (27)$$

У четвертому розділі висвітлені результати теоретичних досліджень гідродинамічних процесів при інерційно-фільтруючій сепарації газорідинних систем з експериментальним визначенням гідравлічних та сепараційних характеристик інерційно-фільтруючих газосепараторів.

Розроблено фізичну модель руху газокраплинних потоків по сепараційних каналах та фільтруючих секціях інерційно-фільтруючих газосепараторів засновану на основних механізмах формування потоку газу та краплин рідини у інерційно-фільтруючих газосепараторах, яка пояснює рух (перенесення) краплин рідини у турбулентному газорідинному потоці, основні механізми та закономірності процесів сепарації, визначає оптимальні гідродинамічні режими для упередження вторинних процесів (руйнування структури плівки вловленої рідини, унесення бризок), що супроводжують основний процес сепарації, для зниження гідравлічного опору та підвищення ефективності сепарації інерційно-фільтруючих сепараторів.

Для порівняльної оцінки результатів розв'язання основних рівнянь гідродинаміки, які покладено в основу розглянутих вище моделей, вирішення теоретичних, експериментальних та практичних задач моделювань гідродинаміки з

метою виявлення основних гідродинамічних закономірностей процесів сепарації на моделях інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв застосовано методи експериментальної і обчислювальної гідродинаміки, математичного (комп'ютерного) моделювання з візуалізацією та узагальненням результатів моделювань.

Так, на рис.10 наведено узагальнення та співставлення результатів (розбіжність результатів не перевищує 5%) розрахунків за аналітичними залежностями (3) і (5) значень складових компонент швидкості руху суцільного потоку з відповідними значеннями, отриманими шляхом експериментальних досліджень методом аеродинамічного зондування на масштабній моделі криволінійного каналу (табл.1).

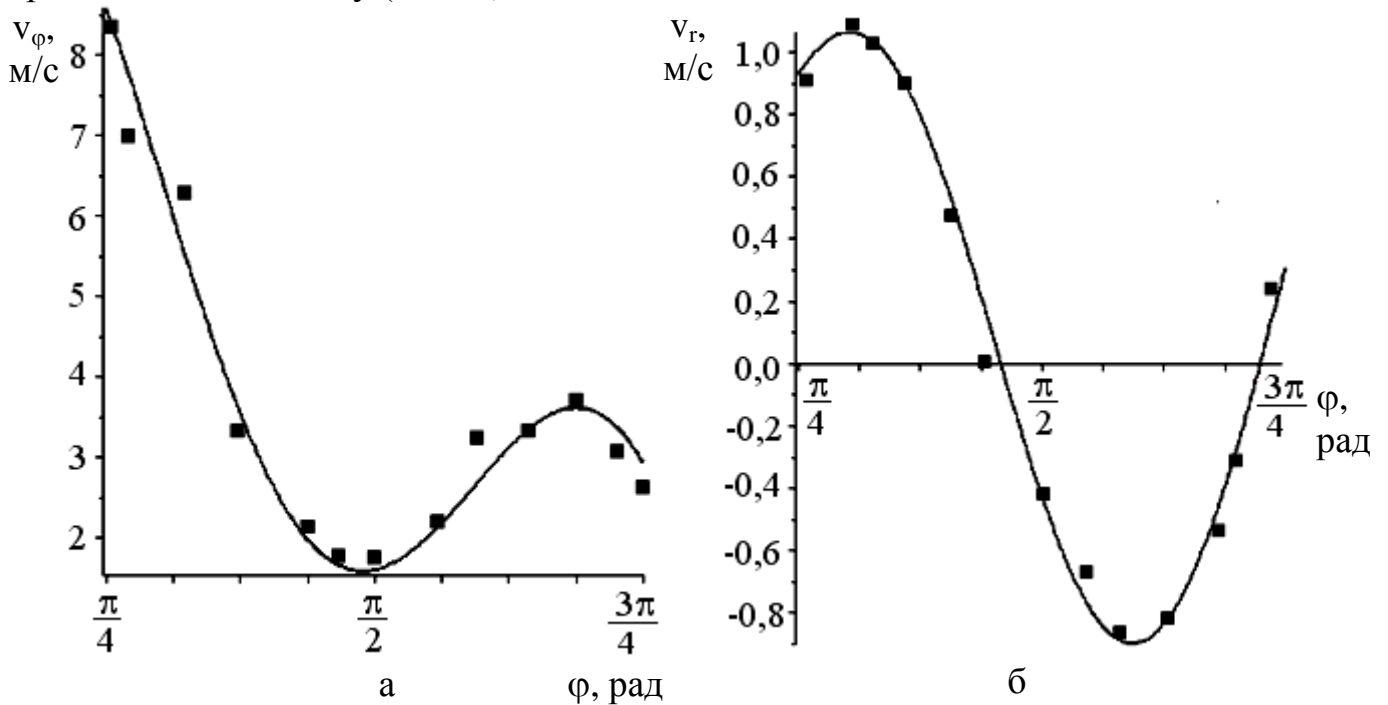


Рис.10. Співставлення розрахункових та експериментальних значень окружної v_ϕ (а) і радіальної v_r (б) складових швидкості руху потоку в криволінійному каналі

Табл.1. Основні параметри та характеристики моделі інерційно-фільтруючого сепараційного каналу (рис.1)

Параметр	Значення
Продуктивність по газу V , м ³ /с	0,01-0,50
Питома витрата рідини до газу L/G , кг/кг	0; 0,1; 0,2; 0,3
Ширина сепараційного каналу (відстань між жалюзями) $t_k \times 10^{-3}$, м	100
Висота каналу (жалюзі) $H \times 10^{-3}$, м	150; 600; 900
Радіус гофр жалюзей $r_1 \times 10^{-3}$, м	25; 55; 70; 100
Кут розкриття гофр ϕ , град	60; 90; 120
Довжина прямолінійних ділянок між гофрамаи $L \times 10^{-3}$, м	100; 150; 200
Тип фільтрувальних елементів (матеріал)	волокнистий (поліпропілен)
Гідравлічний опір Δp , Па	150-350
Ефективність сепарації η , %	70-90

Фізичними та математичними моделюваннями підтверджено, що при режимах $2300 \leq Re \leq 10000$ газовий потік в'язко безвідривно обгинаючи обтікає виступи та западини, практично точно повторюючи геометричну конфігурацію криволінійного сепараційного каналу. Відзначено, що на вхідних ділянках сепараційного каналу та на виході з криволінійних ділянок до місць зміни напрямку кривизни каналу (конфузорні ділянки) локальні швидкості газового потоку в інерційній сепараційній зоні монотонно збільшуються внаслідок звуження перетину каналу (рис.6). Після таких ділянок в області криволінійних ділянок можна виділити гальмівні зони (дифузорні ділянки), обумовлені місцевим розширенням перетину криволінійного каналу. На таких ділянках зі зниженням швидкості газодисперсного потоку (рис.6, 10) зменшується аеродинамічна сила, яка заволікає дисперсні частки (краплі) за основним газовим потоком (рис.7), що полегшує рух часток по інерції до зовнішніх стінок каналу з розташованими на їх внутрішній поверхні фільтр-елементами для ефективної сепарації.

Припускаючи, що на вході в криволінійний інерційно-фільтруючий сепараційний канал краплі рідини рухаються зі швидкістю, яка дорівнює швидкості газового потоку і визначається з рівняння витрати, після визначення за залежностями (13) і (14), (17) і (18) полів швидкостей суцільної та дисперсної складових потоку у інерційній зоні криволінійного сепараційного каналу може бути розраховано і побудовано траєкторії руху часток (рис.11), які знаходяться чисельним циклічним розв'язанням ряду Тейлора для $r(\varphi)$, з наступним розв'язанням статистичної задачі з визначення розрахункового розподілу вловлених часток на зовнішній стінці каналу (рис.12).

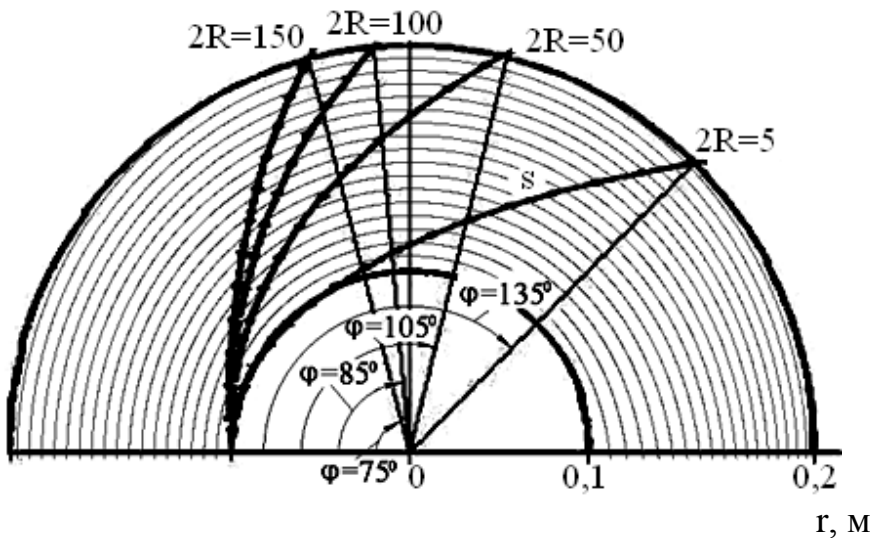


Рис.11. Розрахункові траєкторії руху газового потоку та часток розмірами $2R \times 10^{-6}$ м на криволінійній ділянці сепараційного каналу

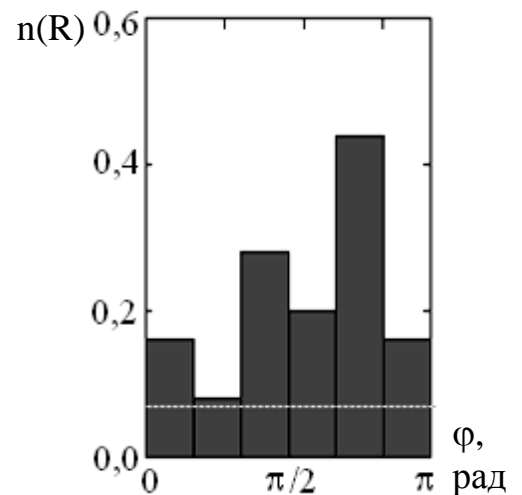


Рис.12. Функція щільності розподілу $n(R)$ вловлених часток на зовнішній стінці сепараційного каналу ($r=r_2$)

Звісно, якщо пройдений краплею шлях за відповідними траєкторіями приблизно дорівнює ширині каналу $s \rightarrow t_k$, то крапля з високою вірогідністю досягає стінки каналу та осаджується на її поверхні, а для оцінки ефективності сепарації слід виходити з припущення, що кожна крапля, яка досягла зовнішньої стінки каналу

(рис.9, $r=r_2$) є вловленою. Таким чином, ефективність сепарації зростає по мірі зменшення ширини каналу (відстані між гофрованими пластинами-жалюзьями) та підвищення швидкості руху газового потоку до припустимих граничних значень, після чого починається вторинне унесення краплин (табл.2).

Табл.2. Порівняльна оцінка за значеннями К-фактору та розмірами $2R$ ефективно вловлюваних краплин інерційних та інерційно-фільтруючих сепараційних вузлів

Найменування	Профіль жалюзей	$K = v / \sqrt{(\rho_L - \rho) / \rho}$, м/с	$2R \times 10^{-6}$, м
Koch-Glitsch FLEXICHEVRON®	трапецеїдальний	0,11-0,35	>10
Sulzer Mellachevron™	кутковий	0,13-0,45	>10
Інерційно-фільтруючий блок СумДУ	синусоїдальний	0,18-0,72	>5

Для підвищення ефективності сепарації необхідно або збільшувати довжину дуг криволінійних ділянок (зменшувати кут розкриття гофр) при тому ж радіусу гофр, або зменшувати радіус при тій же довжині дуги, що одночасно призводить до зростання гідравлічного опору сепараційного каналу (табл.1). Для заданих умов на вході в інерційно-фільтруючий криволінійний сепараційний канал та виході з нього (витрата газового потоку, поля швидкостей та тисків), з урахуванням в'язкості, існує оптимальна геометрична форма каналу, яка забезпечує мінімальні втрати повного тиску (рис.13). Представляється доцільним надати хвилеподібної синусоїдальної форми стінкам криволінійного каналу, уникаючи таким чином з'єднання ділянок криволінійного каналу з кутковими елементами або із стрибкоподібною зміною радіусу кривизни по напрямку руху потоку (рис.13), тому що в цих областях розподіл полів швидкостей і тисків при плинні потоку газу характеризується максимальним значенням окружної складової швидкості (рис.6а, 10а), що свідчить про вірогідність відривної течії. При цьому прямолінійні ділянки виконують функцію розгінних.

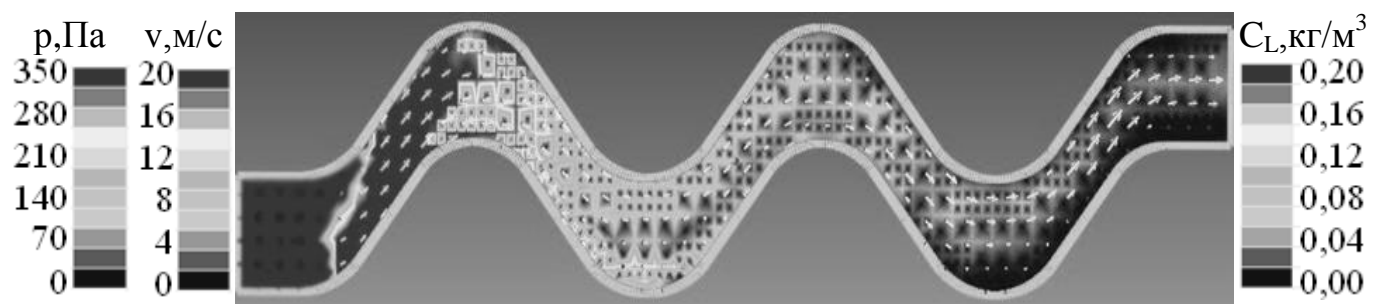


Рис.13. Розподіл полів швидкостей v (вектори), градієнту тисків Δp (фарбування) та вмісту рідини C_L (ізолінії) в потоці газу по криволінійному сепараційному каналу синусоїдального профілю

Таким чином, за результатами проведених математичних моделювань, фізичних та обчислювальних (імітаційних) експериментів одночасно здійснено оптимізаційне аеродинамічне профілювання геометричної конфігурації

криволінійних інерційних сепараційних каналів та визначено області доцільного розташування фільтруючих елементів. Так, аналізом графічних залежностей, наведених на рис.6а та рис.7а з'ясовано, що в області западин з боку зовнішньої стінки криволінійного каналу локальні швидкості сягають мінімальних і навіть можливе вихроутворення, що також доводять і результати комп'ютерних моделювань та експериментальних досліджень (рис.10, 13). Слід відмітити, що краплі рідини уловлюються по всій довжині криволінійної ділянки, але найбільша їх концентрація все ж є в місці западини каналу. Саме в цих зонах на внутрішній поверхні жалюзей є доцільним розташування фільтруючих елементів. При чому їх розмір та геометрія визначається розподілом краплин рідини по зовнішній стінці каналу, отриманим вирішенням статистичної задачі (рис.11, 12, сектор $\varphi=60-150^\circ$), а також характером руху та взаємодії плівки сепарованої рідини з газовим потоком.

У випадку, коли основними механізмами формування крапель у турбулентному потоці газу за відсутності конденсації є процеси подрібнення та коагуляції, які відбуваються одночасно, на вхід до криволінійного каналу потрапляє газокраплинний потік з встановленим визначеним логарифмічно-нормальним розподілом краплин за розмірами $n_0(R)$. Для оцінки ефективності вловлювання дисперсних часток за загальноприйнятим критерієм, яким є коефіцієнт сепарації η , розвинуто континуальну модель криволінійної течії газодисперсного потоку, яка дозволяє розрахунковим методом визначити спосіб розподілу краплин по розмірах

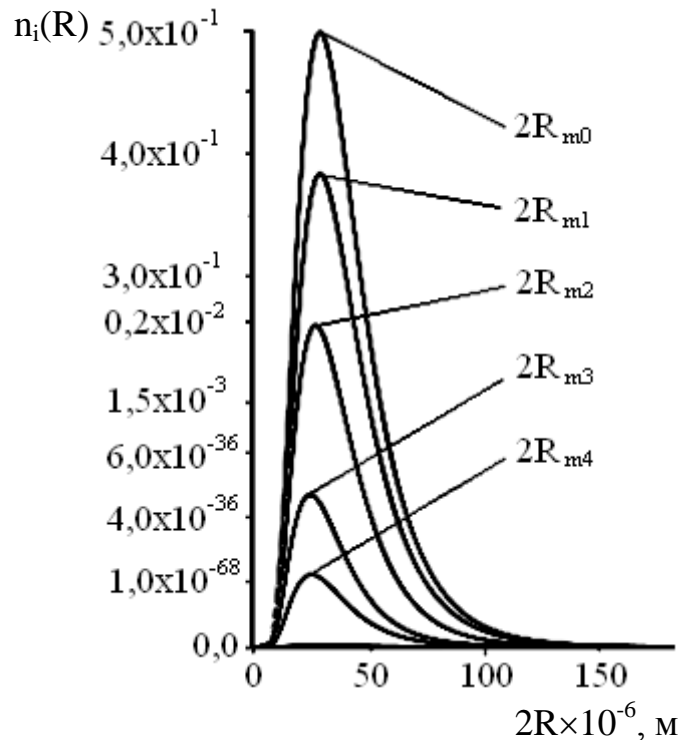


Рис.14. Розрахунковий розподіл за розмірами $n_i(R)$ краплин у потоці після криволінійних ділянок в інерційно-фільтруючому сепараційному каналі

$$n_i(R) = n_{i-1}(R) \frac{v}{v - \frac{C_L \varphi (2r_1 + r_2)}{r_2 - r_1}} \exp \left(\frac{C_L \varphi (3r^2 - 3r(r_1 + r_2) + r_1 r_2 + (r_1 + r_2)^2 / 2) - 4\tau_0 \varphi v ((r_1 + r_2) - 2r)}{r_2 - r_1} \right), \quad (28)$$

і відповідно засобами передаточної функції $\Phi(R) = n_i(R) / n_0(R)$ оцінити ефективність сепарації після кожної послідовної криволінійної ділянки інерційно-фільтруючого сепараційного каналу (рис.14):

$$\eta = 1 - \int_0^\infty \frac{4}{3} \pi R^3 \Phi_i(R) n_0(R) dR \Big/ \int_0^\infty \frac{4}{3} \pi R^3 n_0(R) dR. \quad (29)$$

Фізична суть графічного зображення на рис.15 полягає в тому, що обчислена як інтеграл площа зон між кривими розподілу $n_i(R)$ на вході та виході з відповідних криволінійних ділянок відповідає ефективності сепарації η_i після кожної окремої

криволінійної ділянки, а їх сумарна площа (площа зони обмеженої верхньою OR та нижньою OR_{mi} лініями розподілу) — сумарній ефективності сепарації η . Отримані результати математичних моделювань підтверджують попередні припущення, що для ефективної сепарації ($\eta=99,5-99,9\%$) краплинної рідини у інерційно-фільтруючих сепараційних каналах достатньо від 2 до 4 криволінійних ділянок.

При проведенні наукових досліджень також окремо приділено увагу вибору фільтруючих матеріалів, аналізу їх структури, механічних і фізико-хімічних властивостей, експериментальним дослідженням проникності волокнистих матеріалів, визначенню впливу цих властивостей на ефективність сепарації газорідних систем в інерційно-фільтруючих сепараційних пристроях.

У п'ятому розділі проведено аналіз впливу сполученого міжфазного тепломасообміну на процеси інерційно-фільтруючої сепарації багатокомпонентних газоконденсатних сумішей.

Розвинуто модель інерційно-фільтруючої сепарації, що враховує утворення та конденсаційне зростання краплин в турбулентному потоці газорідної суміші, вплив фазових перетворень та коалесценції краплин конденсату на ефективність процесів інерційно-фільтруючої сепарації з конденсацією за рахунок додаткового охолодження стінок криволінійних сепараційних каналів, що надає можливість вловлювання вологи навіть у вигляді конденсаційного туману. В такій постановці задача зводиться до визначення оптимальних термобаричних умов (T, p) за умов критичного пересичення пари (відношення тиску пари в газовій суміші до тиску насиченої пари над поверхнею рідини), що призводить до конденсації пари і зародження рідинної фази

$$S > 1 \text{ та } S_{кр} \leq S = \left(\frac{T - T_{гр}}{T_0 - T_{гр}} \right)^{\frac{Mc(P-p)}{M_n} \alpha} \frac{p_0 - p_{гр}}{p_n} + \frac{p_{гр}}{p_n}, \quad (30)$$

і визначення кількості сконденсованої рідини в інерційно-фільтруючих сепараційних каналах при зниженні температури нижче критичної ($T \leq T_{кр}$)

$$C_L = \frac{M}{RT} \left[\left(\frac{T - T_{гр}}{T_0 - T_{гр}} \right)^{\frac{Mc(P-p)}{M_n} \alpha} (p_0 - p_{гр}) + p_{гр} - p_n \right]. \quad (31)$$

Після аналізу залежностей (30) і (31), отриманих виходячи з основних рівнянь тепло- та масовіддачі, слід відзначити, що вагова концентрація конденсаційного туману C_L прямопропорційна тиску насиченої пари p_n і пересиченню S , а пересичення S зворотнопропорційно тиску насиченої пари p_n , таким чином витікає, що максимальна вагова концентрація конденсаційного туману досягається при температурі, яка відрізняється від температури, при якій виникає максимальне пересичення пари.

На етапі моделювання процесів міжфазного тепломасообміну при інерційно-фільтруючій сепарації з конденсацією в криволінійних інерційно-фільтруючих сепараційних каналах здійснено спробу вирішення сполученої задачі теплообміну. При цьому застосовано підхід, який дозволяє звести систему диференціальних рівнянь гідродинаміки (рівнянь Нав'є-Стокса) та конвективного теплообміну

(рівнянь Фур'є-Кірхгофа) в приватних похідних до двох незв'язаних крайових задач:

$$a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) = w_{\varphi} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{w_{\varphi}}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi}. \quad (32)$$

При цьому на границі плівки, яка стікає по охолоджуваних стінках сепараційного каналу, слід ввести такі граничні умови (рис.15): $r=r_2$, $T=T_{ст}=\text{const}$; $r=r_2$, $\lambda \partial T / \partial r = \alpha (T_{ст} - T_{гр})$; $r=r_{гр}$, $T=T_{гр}$ ($r_{гр}=r_2-\delta$). Приймаючи, що закон розподілу температури по товщині плівки апроксимується квадратичним поліномом $T = a + br + cr^2$:

$$\begin{cases} T(r_2) = a + br_2 + cr_2^2 = T_{ст}, \\ T'(r_2) = b + 2cr_2 = -\frac{\alpha}{\lambda} (T_{гр} - T_{ст}), \\ T(r_2 - \delta) = a + b(r_2 - \delta) + c(r_2 - \delta)^2 = T_{гр}. \end{cases} \quad (33)$$

Після спрощень та перетворень рівнянь (31)-(32), диференціювання функції температури та осереднення по товщині плівки визначається температурний градієнт рідини у стінки криволінійного каналу (початковий перепад температур на границі між фазами і стінкою на вході в сепараційний канал ΔT_0), що має вигляд наступного закону розподілу поля температур:

$$T_{гр}(r, \varphi) = T_{ст} + \frac{\Delta T_0}{\lambda_1 - \lambda_2} (\lambda_1 e^{\lambda_2 \varphi} - \lambda_2 e^{\lambda_1 \varphi}), \quad (34)$$

який містить корені $\lambda_{1,2} = -a_1 \pm \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$ характеристичного рівняння $\lambda^2 + 2a_1 \lambda - a_2^2 = 0$, що визначаються за введеними безрозмірними параметрами a_1, a_2 .

З використанням отриманих залежностей здійснено оптимізаційні розрахунки процесів промислової підготовки, відбензинювання та фракціонування природного газу способами низькотемпературної сепарації (НТС) і низькотемпературної конденсації (НТК) в промислових умовах, виходячи з фазових співвідношень в умовах рівноваги багатоконпонентних сумішей та значень коефіцієнтів розподілу компонентів двофазної системи, а також визначено вплив фазових перетворень на ефективність процесів сепарації вологи та вуглеводневого конденсату з природного газу з отриманням зріджених вуглеводневих газів.

У шостому розділі розроблено науково обґрунтовані практичні рекомендації до проектування сепараційних установок для різних галузей промисловості, а також наведено практичну реалізацію результатів дисертаційної роботи.

Визначено умови реалізації процесів інерційно-фільтруючої сепарації високодисперсної краплинної рідини, запропоновано окремий клас нових способів сепарації та нових конструкцій інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв, які захищено 18 патентами починаючи з 2003 року (патентовласник — СумДУ), а їх

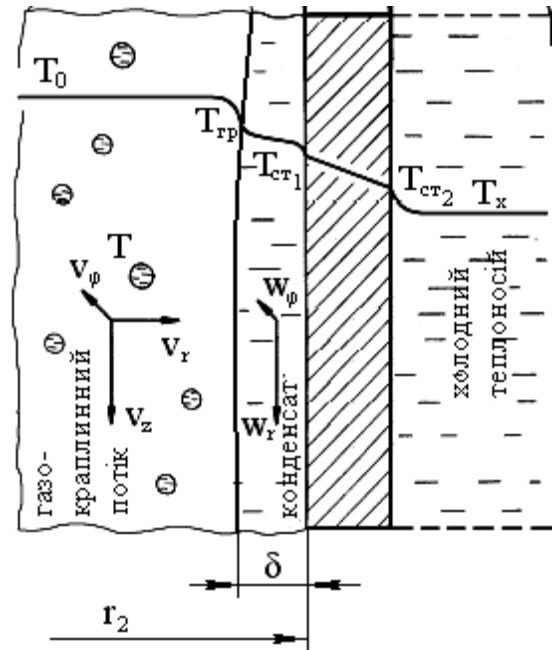


Рис.15. Схема об'ємної та плівкової конденсації на охолоджуваних стінках сепараційного каналу

дослідно-промислові зразки впровадженні у виробництво впродовж 2003-2016 років. В той же час, деякі наближені по суті способи і технічні рішення (подвійні жалюзі, пастки та дренажні канали), реалізовані в удосконалених насадкових жалюзійних секціях Mellachevron[™] і FLEXICHEVRON[®], запатентовані лише з 2007 року (патентовласники — Sulzer AG, Koch-Glitsch) та запроваджені в масове виробництво тільки у 2013-2014 роках. Інші винайдені в рамках проведених дисертаційних досліджень способи та технічні рішення (паралельне поєднання процесів інерційного вловлювання та механізмів фільтрування; динамічне регулювання значення та напрямку швидкості руху газорідного потоку; створення умов для керованої пульсації газорідного потоку за рахунок утворення розгінних та гальмівних ділянок у криволінійних каналах; напівпроникні подвійні жалюзі з фільтр-коалесцерами між ними; поєднання процесів інерційно-фільтруючої сепарації з конденсацією пароподібної вологи на поверхні охолоджуваних стінок криволінійних каналів з подачею охолоджуючого теплоносія у дренажні канали подвійних жалюзей) й досі не мають аналогів у світі. Основні відмінності нових способів інерційно-фільтруючої сепарації та переваги інерційно-фільтруючих сепараторів: фільтр-елементи — коагулятори (коалесцери) виконують функції додаткової сепарації в інерційних криволінійних сепараційних каналах; система переливних жолобів та дренажних каналів забезпечує організоване відведення вловленої рідини, уникаючи прямого контакту плівки рідини з газовим потоком, що знижує вторинне бризкоунесення (до $0,015 \times 10^{-3}$ кг/м³); додаткове охолодження надає можливість вловлювання вологи навіть у вигляді конденсаційного туману, при цьому забезпечується ефективно вловлювання високодисперсних краплин (розміром $2R > 5 \times 10^{-6}$ м); тривалий міжрегенераційний ресурс обумовлений режимом стаціонарної фільтрації (фільтр-елементи працюють в режимі самоочищення), по досягненню якого гідравлічний опір, ефективність сепарації, кількість утримуваної рідини у фільтруючому шарі та стікаючої рідини з нього залишаються постійними з часом, при цьому кількість мігруючої рідини дорівнює кількості рідини, що потрапляє в шар; підвищення продуктивності досягається за рахунок розширення діапазону ефективної роботи, а низький гідравлічний опір (15000-30000 Па) порівняно з сітчастими відбійниками та фільтрами і висока ефективність сепарації (до 99,5-99,9%) забезпечується в широкому діапазоні зміни масового співвідношення фаз, продуктивності, температури та тиску (табл.3).

Табл.3. Умови та результати випробувань дослідно-промислових зразків газосепараторів (рис.3, 16)

Параметр	Значення
Продуктивність по газу V , млн. м ³ /добу	0,2; 0,4; 0,5; 1,2; 5,0
Робочий тиск p , МПа	6; 8; 10; 12; 14
Робоча температура t , °С	-15; 15; 50
Вміст рідини на вході C_{L0} , кг/м ³	0,05; 0,30
Вміст рідини на виході $C_L \times 10^{-3}$, кг/м ³	0,015
Гідравлічний опір апарату Δp , МПа	0,015-0,030
Ефективність сепарації η , %	97-99

Таким чином, за основними технічними характеристиками пропонувані інерційно-фільтруючі сепаратори (рис.16) не поступаються відомим світовим аналогам: комбінованим багатоступеневим дво- та трьохфазним сепараторам від ДОО ЦКБН ОАО «Газпром» (РФ), концернів Sulzer AG (Швейцарія) та Shell Global Solution (Нідерланди), фірм-ліцензіарів сепараційних вузлів Koch-Glitsch (США), сітчастих відбійників Monsanto Enviro-Chem Systems, ACS Industries (США) та фільтр-коалесцерів Pall Corporation (США), апаратам «Heater-Treater» фірм «Cameron's NATCO», «Sivalls, Inc.» та «EN-FAB, Inc.» (США), апарату «Free Water Knock-Out» (FWKO) виробництва «Maloney Industries, Inc.» (Канада).

Використовуючи результати теоретичних і експериментальних досліджень та у відповідності до обраної стратегії оптимізаційних моделювань розроблено науково обґрунтовані практичні рекомендації, методики та алгоритми до комп'ютерно-інтегрованих технологій проектування і автоматизованих розрахунків інерційно-фільтруючого сепараційного обладнання для блоків сепараційних установок, статичного та динамічного оптимізаційного моделювання з метою підвищення ефективності процесів сепарації та зниження гідравлічного опору сепараційного обладнання з визначенням оптимальних конструктивних параметрів (розміри жалюзійного блоку, ширина сепараційних та дренажних каналів, товщина шару фільтру, радіус гофр жалюзей, довжина каналу та кількість гофр, висота каналу та висота розташування переливних жолобів) та компонування інерційно-фільтруючих сепараційних вузлів в корпусах комбінованих апаратів (рис.16).

У додатках наведені програма та методика дослідно-промислових випробувань нових інерційно-фільтруючих сепараторів та блоків сепараційних установок, матеріали експериментальних досліджень, комп'ютерних моделювань та промислових випробувань експериментальних і дослідно-промислових зразків інерційно-фільтруючих сепараторів, техніко-економічні розрахунки пропонувані рішень з актами впровадження (використання) наукових результатів та практичних рекомендацій, отриманих у дисертаційній роботі.

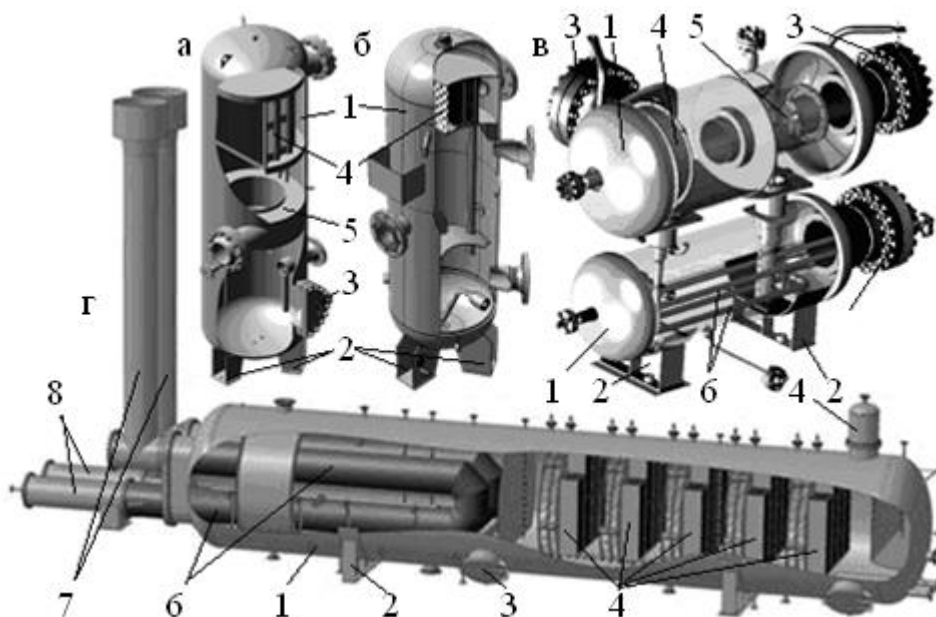


Рис.16. Впроваджені дослідно-промислові зразки інерційно-фільтруючих сепараторів: а, б - газосепаратори; в - блочний сепаратор; г - нафтогазоводорозділювач («Heater-Treater»); 1 – корпус; 2 – опори; 3 – люк; 4 – насадкові жалюзійні інерційно-фільтруючі сепараційні секції; 5 – відцентрові сепараційні секції; 6 – труби теплообмінні (жарові); 7 – труби димові; 8 – пальники з калориферами

ВИСНОВКИ

На підставі основних законів теорії гідродинаміки і тепломасообміну та на основі комплексних теоретичних та експериментальних досліджень у дисертаційній роботі розроблено та обґрунтовано наукові положення, висновки та рекомендації, сукупність яких представляє нові науково обґрунтовані результати у галузі процесів та обладнання хімічної технології, які розв'язують науково-прикладну проблему, що полягає в розробці теоретичних основ гідродинамічних та тепломасообмінних процесів під час інерційно-фільтруючої сепарації газорідних систем.

Отримані науково-практичні результати полягають у наступному:

1. На підставі аналізу способів розділення багатоконпонентних газоконденсатних систем визначено, що процеси сепарації за механізмами інерційного вловлювання та фільтрування недостатньо досліджені в аспекті гідродинаміки течій по криволінійних каналах, що унеможлиблює отримання рекомендацій по місцю розташування фільтруючих елементів в таких каналах, відсутнє математичне моделювання процесів, зокрема, у випадках поєднання процесів інерційно-фільтруючої сепарації та сепарації зі сполученим тепломасообміном.
2. За допомогою теоретичного аналізу основних механізмів вловлювання дисперсних часток інерційно-фільтруючими сепараційними елементами визначено основні закономірності процесів гравітаційного осадження та інерційного захоплення краплин, їх осадження на волокна фільтруючого елемента та плівку вловленої рідини в криволінійних каналах, чим закладено теоретичні основи теорії інерційно-фільтруючої сепарації аеродисперсних систем.
3. Отримав подальший розвиток науковий підхід до фізичного моделювання та теоретичних досліджень гідродинамічних процесів при інерційно-фільтруючій сепарації газорідних систем, розробки методів розв'язання основних рівнянь гідродинаміки та математичного моделювання гідродинамічних процесів при інерційно-фільтруючій сепарації. Вперше отримано аналітичний розв'язок рівнянь руху і нерозривності потоку відносно складових локальних швидкостей газового потоку для окремого випадку плоскої невісесиметричної течії в криволінійному каналі, обмеженого стінками синусоїдального профілю. Розширено уявлення про основні методи і механізми інерційно-фільтруючої сепарації, на підставі запропонованої фізичної моделі руху газокраплинних потоків в каналах інерційно-фільтруючих сепараторів, вперше отримано чисельне розв'язання рівнянь руху газодисперсного середовища, що дозволяє визначити траєкторії руху краплин і здійснити оптимізаційне гідродинамічне профілювання криволінійних каналів, визначити зони доцільного розташування та розмір фільтрелементів.
4. За результатами експериментальних досліджень модельних зразків і їх узагальнення визначено основні гідродинамічні та сепараційні характеристики сепараційних секцій інерційно-фільтруючих газосепараторів (К-фактор 0,18-0,72 м/с, гідравлічний опір до 350 Па, вловлювання краплин розміром від 5×10^{-6} м, ефективність сепарації до 70-90%). Адекватність поширення отриманих залежностей обмежується областю перехідного та турбулентного гідродинамічних режимів руху газового потоку ($2300 \leq Re \leq 100000$), а також ламінарного режиму стікання сепарованої рідини в плівці без хвилеутворення ($Re_{пл} < 30$).

5. Обґрунтовано вибір волокнистих фільтруючих матеріалів з термопластичного полімеру пропілену, досліджено вплив їх властивостей на умови відведення вловленої рідини та ефективність сепарації газодисперсних систем. Дістала подальший розвиток континуальна модель криволінійної течії газодисперсного потоку, що дозволяє розрахунковим методом визначити спосіб розподілу краплин по розмірах і відповідно оцінити ефективність сепарації після кожної послідовної криволінійної ділянки сепараційного каналу, з застосуванням якої доведено, що для ефективної сепарації (99,5-99,9%) краплинної рідини у інерційно-фільтруючих сепараційних каналах достатньо 2-4 криволінійних ділянки.

6. Набув подальшого розвитку науковий підхід до аналізу впливу сполученого міжфазового тепломасообміну на процеси інерційно-фільтруючої сепарації багатокомпонентних газоконденсатних сумішей, аналізом фізичних основ конденсаційного зростання краплин в турбулентному потоці газорідинної суміші розширено уявлення про основні механізми утворення конденсаційного туману, а також методи збільшення розміру краплин рідини при проходженні газорідинної суміші крізь сепараційні пристрої попередньої конденсації.

7. Запропоновано окремий клас нових, захищених патентами, способів сепарації та нових конструкцій інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв, що дозволяють суттєво підвищити ступінь розділення (до 99,5-99,9% при швидкостях руху потоку на вході в канал 3-20 м/с) та знизити гідравлічний опір (150-2000 Па для вузлів, 15000-30000 Па для апаратів) за рахунок уникнення вторинних процесів. Утворення хвиль на поверхні плівки та вторинне унесення бризок з інерційно-фільтруючих сепараційних каналів відбувається при підвищенні швидкостей потоків до деяких критичних значень (25-30 м/с).

8. Розроблено науково обґрунтовані практичні рекомендації до проектування та інженерних методик для розрахунку газодинамічних сепараторів з метою підвищення ефективності сепарації та зниження гідравлічного опору з визначенням оптимальних конструктивних параметрів інерційно-фільтруючих сепараційних елементів. Розроблено програму та методику дослідно-промислових випробувань нових інерційно-фільтруючих сепараторів та блоків сепараційних установок.

9. Розроблені наукові положення та методичні рекомендації використано при підготовці навчальних посібників «Технологічні основи нафто- та газопереробки», «Обладнання газо- та нафтопереробних виробництв», а отримані наукові результати та практичні рекомендації впроваджені у виробництво на машинобудівних заводах, підприємствах хімічної промисловості і нафтогазового комплексу України та іноземних держав (ПАТ «Сумське НВО ім.М.В.Фрунзе», АТ «Сумський завод «Насосенергомаш», холдинг «Група ГМС», Група «Лукойл», концерн «Укрросметал», ТОВ НПВ «Машхімнафтосервіс», ПАТ «Укрхімпроект», ТОВ «Агросервіс», ТОВ «Сумифітоформація», ПрАТ «Укргазвидобуток», Представництво «Регал Петролеум Корпорейшн Лімітед» та інші). Орієнтовні строки окупності нових газосепараторів інерційно-фільтруючого типу — до 3-х років, а у випадку модернізації існуючого сепараційного обладнання — до 1,5 року. Річний економічний ефект від модернізації сепаратора продуктивністю 50 тис. $\text{нм}^3/\text{годину}$ природного газу за рахунок додаткового прибутку від реалізації вуглеводневого конденсату складає від 3 млн. грн./рік.

ОСНОВНІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

ρ – густина, кг/м^3 ; μ – динамічна в'язкість, $\text{Па}\cdot\text{с}$; τ – дотичне напруження, Н/м^2 ; ε – коефіцієнт турбулентної в'язкості; α – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Дж}/(\text{м}^2\cdot\text{с}\cdot\text{К})$; β – коефіцієнт масовіддачі, $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с}\cdot\text{Па})$; η – ступінь розділення (ефективність сепарації), %; δ – товщина, м; τ_0 – час релаксації частки (краплі), с; φ_G – об'ємна доля газової фази в газорідному потоці (газовміст); ΔT_0 – початковий перепад температур на границі між фазами і стінкою на вході в сепараційний канал, К; a – коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$; c – теплоємність газової суміші, $\text{Дж}/\text{кг}$; C_L – вагова концентрація краплинної рідини в газовому потоці, $\text{кг}/\text{м}^3$; d_m ($2R_m$) – середній усталений діаметр краплин, утворених в процесі зіткнення та вторинного подрібнення, м; R – радіус краплин, м; g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; H – висота каналу (жалюзі), м; h – висота розташування переливних жолобів, м; K – коефіцієнт, що враховує співвідношення потоків (вміст рідини в газовому потоці), в'язкість рідини та газу, тиск газу, поверхневе тертя (K -фактор), $\text{м}/\text{с}$; k – проникність волокнистого матеріалу фільтр-елементу, м^2 ; L – довжина прямолінійних ділянок між гофрами жалюзей, м; L/G – питома витрата рідини до газу, $\text{кг}/\text{кг}$; m – маса краплі, кг ; M – середня молекулярна маса газової суміші, $\text{кг}/\text{моль}$; $n_i(R)$ – функція щільності розподілу часток (краплин) за розмірами, доли; p – тиск, Па ; q_r – кількість краплинної рідини, що потрапляє в шар фільтру з криволінійного сепараційного каналу, $\text{кг}/\text{с}$; r_1 , r_2 та r_m – внутрішній, зовнішній та середній радіуси криволінійного каналу, м; s – траєкторія руху часток (краплин), м; S – пересичення пари; t – час, с; T – абсолютна температура, К; t_k – ширина сепараційного каналу (відстань між жалюзями), м; u – швидкість фільтраційного руху рідини, $\text{м}/\text{с}$; V – об'ємна витрата, $\text{м}^3/\text{с}$; v – швидкість руху потоку, $\text{м}/\text{с}$; w – швидкість руху краплі, $\text{м}/\text{с}$; Δp – гідравлічний опір, Па . **Безрозмірні комплекси, параметри, коефіцієнти та константи:** Re – критерій Рейнольдса; R – газова стала, $\text{Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$; A, B, C, F, M, N – коефіцієнти розкладання поліному; $a_{1,2}$ – введені безрозмірні параметри; $A_i(r, \varphi)$ та $f_i(r)$ – сімейство функцій, що підлягають визначенню, та лінійно незалежні функції з нескінченного ряду; a_k – коефіцієнти опору; C_D – коефіцієнт опору часток; $C_{1,k}$ – константи інтегрування; $\beta(r)$ – функція витрати; $\psi_i(r)$ – функції розподілу; γ_i – коефіцієнти сил тертя; θ, κ, σ – постійні коефіцієнти однорідного диференціального рівняння третього порядку; $\kappa_{1,2,3}$ – коефіцієнти витрати; $\lambda_{1,2,\kappa}$ – корені характеристичного рівняння; ξ_i – коефіцієнти конвективних сил інерції; $\Phi(R)$ – передаточна функція сепараційного пристрою. **Індекси:** $_0$ – початковий стан; $_{кр}$ – критичний стан; $_н$ – насичений стан; $_G$ – газ; $_L$ – рідина; $_{гр}$ – на поверхні розділення фаз (міжфазовій поверхні); $_{ст}$ – на стінці; $_{пл}$ – в плівці рідини; $_к$ – канал; $_ф$ – фільтр; $_ф$ – окружна (тангенціальна) складова; $_r$ – радіальна (нормальна) складова; $_x, _y, _z$ – проекції на вісі координат відповідно.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Моделирование и проектирование инерционно-фильтрующих газосепараторов-конденсаторов для компрессорных установок нефтегазовой промышленности / [Склабинский В.И., Ляпощенко О.О., Настенко О.В., Аль-Раммахи М.М.] // Проблемы теории и практики центробежных машин: монография / под ред. И.Б.Твердохлеба, А.В.Загорулько, С.Н.Гудкова. — Сумы: ООО «ПД «Папирус», 2014. — С.111-120. *Здобувачем поставлено задачі моделювання гідродинаміки та сполученого теплообміну в сепараторах-конденсаторах.*
2. Modelling and Design of Inertial – Filtering Gas Separators-Condensers for Compressor Units of Oil and Gas Industry / [V.I.Sklabinskyi, A.A.Liaposhchenko, O.V.Nastenko, M.M.Al-Rammahi] // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol.630. — P.117-123. *Здобувачем проведено математичне моделювання гідродинаміки та сполученого теплообміну в інерційно-фільтруючих сепараторах.*

3. Hydrodynamics modelling of gas separator inertial and filter elements for natural gas fine cleaning / [V.Sklabinsky, O.Liaposhchenko, A.Logvyn, M.Al-Rammahi] // Chemistry & Chemical Technology. — 2014. — Vol.8. — №4. — P.479-485. *Здобувачем розроблено експериментальний стенд, проведено фізичні та математичні моделювання роботи інерційних та фільтруючих пристроїв.*
4. Lyaposchenko, O.O. Analysis of the conditions of phase equilibrium and influence of the united heat and mass transfer on the effectiveness of separation in the inertial-filtering separator / O.O.Lyaposchenko, O.V.Nastenko // Chemistry & Chemical Technology. — 2015. — Vol.9. — №1. — P.125-130. *Здобувачем проведено аналіз впливу тепломасообміну на умови фазової рівноваги та механізми інерційно-фільтруючої сепарації газоконденсатних сумішей.*
5. Hydrodynamics of inertial-filtering (IF) separate sections of gas-separating oil and gas equipment / [V.I.Sklabinskiy, A.A.Lyaposchenko, A.V.Logvyn, Mustafa makki Al-Rammahi] // Journal of Missan researches. — 2012. — Vol.8. — №16. — P.207-226. *Здобувачем сформульовано мету та задачі досліджень, експериментально визначено основні гідродинамічні характеристики інерційно-фільтруючих секцій.*
6. Artyukhov, A. Conditions of counterflow motion phases on mass transfer and separation trays for distillation and absorption columns / A.Artyukhov, O.Liaposhchenko // Journal of Hydrocarbons Mines and Environmental Research. — 2014. — Vol.5(1). — P.21-27. *Здобувачем обґрунтовано можливість створення протитечійного руху потоків у масообмінно-сепараційних контактних пристроях для колонних апаратів.*
7. Gas Flow Formation in the Inertial Filtering (IF) Gas Separators Curvilinear Channels / V.I.Sklabinskiy, A.A.Liaposhchenko, V.V.Logvyn, Mustafa Makki Al Rammahi // Journal of Engineering. — 2014. — Vol.10. — №5. — P.160-169. *Здобувачем обґрунтовано модель формування поля швидкостей потоку в залежності від геометрії криволінійних сепараційних каналів.*
8. Nastenko, O. Mathematical modelling of separation process by coupled heat transfer in the inertial-filtering gas separator-condenser / O.Nastenka, O.Liaposhchenko, L.Broniarz-Press // Inżynieria i Aparatura Chemiczna. — 2016. — №2. — P.62-63. *Здобувачем розроблено алгоритм моделювань процесів сепарації з теплообміном.*
9. Ляпощенко, О.О. Удосконалення процесів газосепарації та газосепараційного обладнання нафтогазопереробних виробництв // Збірник наукових праць: «Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій». — Одеса, 2006. — Вип.28. — Т.2 — С.37-38.
10. Склабінський, В.І. Дослідження високоефективного інерційно-фільтруючого сепараційного обладнання компресорних установок нафтогазової промисловості / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. — 2006. — №10(94). — С.112-119. *Здобувачем досліджено гідродинаміку тривимірних течій по криволінійному сепараційному каналу.*
11. Склабинский, В.И. Гидродинамические особенности движения двухфазных потоков в инерционно-фильтрующих сепараторах / В.И.Склабинский, А.А.Ляпощенко, А.В.Логвин // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. — 2009. — №1. — С.79-83. *Здобувачем визначено основні технічні характеристики інерційно-фільтруючих сепараційних елементів.*
12. Ляпощенко, О.О. Розробка енергоефективної технології осушування та очищення природного газу з застосуванням багатofункціонального абсорбера / О.О.Ляпощенко, Ю.О.Толстун // Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій. — Одеса, 2009. — Вип.35. — Т.2. — С.75-79. *Здобувач запропонував новий спосіб підготовки газу, розробив конструкцію апарату.*
13. Артюхов, А. Є. Перспективи отримання гранул з особливими властивостями в малогабаритних вихрових апаратах / А.Є.Артюхов, О.О.Ляпощенко, В.І.Склабінський // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. — 2009. — №4. — С.14-21. *Здобувачем розроблено інерційно-фільтрувальну вихрову камеру для вихрового гранулятора.*

14. Ляпощенко, О.О. Інерційно-фільтрувальне сепараційне обладнання установок термохімічної переробки нафтових шламів нафтопромислових виробництв / О.О.Ляпощенко, В.І.Склабінський, А.В.Логвин // Вісник Національного університету „Львівська політехніка” / Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. — 2009. — №659. — С.148-150. *Здобувач приймав участь у проведенні, узагальненні та аналізі результатів експериментальних досліджень.*
15. Гідродинаміка апаратів с вихревыми и высокотурбулизованными потоками / [К.В.Коробченко, А.Е.Артюхов, А.А.Ляпощенко, В.И.Склабинский] // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. — 2010. — Вип. 37. — С.310-315. *Здобувач визначив теоретичні підходи до опису гідродинаміки апаратів з вихровими та високотурбулізованими потоками.*
16. Розробка методики інженерного розрахунку енергоефективних абсорберів з масообмінно-сепараційними контактними ступенями / [А.Є.Артюхов, О.О.Ляпощенко, К.В.Коробченко, О.Ю.Смілянська] // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. — Одеса, 2011. — Вип. 39. — С.62-65. *Здобувачем поставлено задачі досліджень взаємозв'язку технологічних та конструктивних параметрів сепараційних елементів.*
17. Мустафа Аль Роммахи. Фізична модель руху газокраплинних потоків сепараційними каналами та фільтруючими секціями інерційно-фільтруючих газосепараторів / Мустафа Аль Роммахи, А.В.Логвин, О.О.Ляпощенко // Нафтогазова енергетика. — 2011. — №2(15). — С.5-11. *Здобувачем сформульовано задачі досліджень, розроблено фізичну модель, проведено аналіз результатів експериментальних досліджень, сформульовано висновки.*
18. Смілянська, О.Ю. Створення умов протитечійного руху фаз на тарілчастих масообмінно-сепараційних контактних пристроях / О.Ю.Смілянська, А.Є.Артюхов, О.О.Ляпощенко // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. — 2011. — №4(41). — С.92-95. *Здобувачем сформульовано мету та задачі досліджень, експериментально визначено гідродинамічні режими роботи пристроїв.*
19. Аль Раммахі Мустафа М.М. Разработка физической модели движения газокрапельных потоков в рабочей полости инерционно-фильтрующих сепараторов / Мустафа Аль Раммахи, А.В.Логвин, А.А.Ляпощенко // Хімічна промисловість України. — 2012. — №6. — С.18-21. *Здобувач запропонував метод оптимізаційного профілювання сепараційного каналу та фільтруючих елементів.*
20. Моделювання процесів сепарації та прогнозування ефективності роботи газосепараторів промислових установок газових та газоконденсатних родовищ / [О.О.Ляпощенко, В.М.Маренок, А.В.Логвин та ін.] // Компрессорное и энергетическое машиностроение. — 2013. — №2(32). — С.13-17. *Здобувачем сформульовано мету і поставлено задачі досліджень, зроблено висновки.*
21. Ляпощенко, О.О. Фазова рівновага газорідних систем при інерційно-фільтруючій сепарації / О.О.Ляпощенко, О.В.Настенко // Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій. — Одеса, 2013. — Вип.43. — Т.1. — С.90-93. *Здобувачем сформульовано мету досліджень, розвинуто науковий підхід щодо опису впливу умов фазової рівноваги газорідних систем ефективність сепарації.*
22. Застосування сучасних високоефективних інерційно-фільтрувальних сепараторів у харчовій промисловості / [Мустафа Аль Раммахі, А.В.Логвин, О.О.Ляпощенко, В.І.Склабінський] // Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій. — Одеса, 2013. — Вип.44. — Т.1. — С.277-281. *Здобувачем поставлено задачі досліджень, здійснено співставлення і аналіз результатів.*
23. Кулінченко, Г.В. Ідентифікація моделі процесу низькотемпературної сепарації природного газу / Г.В.Кулінченко, П.В.Леонтьєв, О.О.Ляпощенко // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. — 2014. — №14. — С.143-154. *Здобувач розробив алгоритм автоматизованого програмного керування процесом сепарації газоконденсатної суміші в установці низькотемпературної сепарації.*

24. Склабінський, В.І. Методика та стратегія оптимізаційних досліджень при динамічному моделюванні процесів інерційно-фільтруючої сепарації у високоефективному енергозберігаючому газосепараційному обладнанні з застосуванням інтегрованих SCADA програмно-апаратних комплексів / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, О.В.Настенко // Інтегровані технології та енергозбереження. — 2014. — №4. — С.89-95. *Здобувачем обрано методу та стратегію оптимізаційних моделювань.*
25. Гальваническое цинкование. Технологическая схема улавливания оксида цинка из стоков промывных ванн / [С.Б.Большанина, И.Г.Воробьева, А.А.Ляпощенко и др.] // Хімічна промисловість України. — 2015. — №2. — С.51-57. *Здобувачем запроваджено метод визначення дисперсного складу.*
26. Моделювання процесів сепарації та розробка методики розрахунку трифазного сепаратора / [О.О.Ляпощенко, І.В.Павленко, Р.Ю.Усик, М.М.Дем'яненко] // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій: науковий журнал. — Серія «Технічні науки». — 2015. — №47. — Т.1. — С.62-66. *Здобувачем закладено основні принципи та алгоритм інженерного розрахунку фазних розділювачів.*
27. Решение дифференциальных уравнений Навье-Стокса и задачи гидроаэроупругости для процессов сепарации в криволинейных каналах / [М.Н.Демьяненко, А.А.Ляпощенко, И.В.Павленко, В.И.Склабинский] // Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». — 2015. — № 27. — С.53-64. *Здобувачем отримано аналітичний розв'язок рівнянь Нав'є-Стокса для течії у плоскому криволінійному каналі.*
28. Physical model of high-disperse gas-condensate systems formation in turbulent gas flow [Електронний ресурс] / [О.О.Lyaposchenko, O.V.Nastenko, A.V.Logvin, M.M.Al-Rammahi] // Modern scientific research and their practical application. — 2013. — Режим доступу до ресурсу: <http://www.sworld.com.ua/e-journal/J21310.pdf>. *Здобувачем розроблено фізичну модель формування газоконденсатних систем в турбулентному потоці газу.*
29. Patent №3695 Iraq, B01D53/94 B01D53/02 B01J23/44. Method of cleaning natural and associated oil gas from water and hydrocarbon condensate / Sklabinskiy V.I., Lyaposchenko A.A., Logvyn A.V., Mustafa makki Al-Rammahi. — № 277/2012; request 18.10.2012; published 11.03.2013. — Bagdad: Central Organization for Standardization and Quality Control (C.O.S.Q.C.), 2013. *Здобувачем розроблено новий спосіб сепарації газоконденсатних систем.*
30. Пат. на винахід 88558 С2 Україна, МПК6 В01D45/04 (2008.01). Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку і пристрій для його здійснення / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, А.В.Логвин, О.С.Міщенко (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № а200802372; заявл. 25.02.2008; опубл. 26.10.2009, бюл. №20. *Здобувачем розроблено новий спосіб сепарації газоконденсатних систем та сепараційний пристрій.*
31. Пат. на винахід №111406 С2 Україна, МПК В01J2/16 В01J2/04. Спосіб гранулювання у вихровому зваженому шарі з очищенням відпрацьованого теплоносія та пристрій для його здійснення / А.Є.Артюхов, О.О.Ляпощенко, В.С.Ведмедера (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № а201409522; заявл. 29.08.2014; опубл. 25.04.2016, бюл. №8. *Здобувачем розроблено новий спосіб очищення газів, що відходять, та інерційно-фільтруючий сепараційний пристрій.*
32. Пат. на корисну модель 41600 U Україна, МПК6 В01D45/04 (2009.01). Пристрій для вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, А.В.Логвин (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № u200900649; заявл. 29.01.2009; опубл. 25.05.2009, бюл. №10. *Здобувачем розроблено новий сепараційний пристрій.*

33. Пат. на корисну модель на корисну модель 56067 U Україна, МПК6 B01D45/04. Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, А.Є.Артюхов, А.В.Логвин, К.В.Коробченко (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № u201007411; заявл. 14.06.2010; опубл. 27.12.2010, бюл. №24. *Здобувачем розроблено новий спосіб сепарації газоконденсатних систем.*
34. Пат. на корисну модель 48961 U Україна, МПК9 B01D53/14. Спосіб очищення та осушування природного газу / О.О.Ляпощенко, Я.О.Бакаєва, Ю.О.Толстун (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № u200911023; заявл. 02.11.2009; опубл. 12.04.2010, бюл. №7. *Здобувачем розроблено новий спосіб підготовки газу.*
35. Пат. на корисну модель 60742 U Україна, МПК6 B01D45/04 (2006.01). Спосіб очищення газів / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, К.В.Коробченко, Ю.Г.Парфіло; заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № u2010150; заявл. 13.12.2010; опубл. 25.06.2011, бюл. №12. *Здобувачем розроблено новий спосіб очищення газу.*
36. Пат. на корисну модель 57790 U Україна, МПК6 B01D3/30. Пристрій для вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку / В.Я.Стороженко, О.О.Ляпощенко, В.В.Трушин, К.В.Коробченко (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № u201010546; заявл. 31.08.2010; опубл. 10.03.2011, бюл. №5. *Здобувачем розроблено новий сепараційний пристрій.*
37. Пат. на корисну модель 57386 U Україна, МПК6 B01D45/04. Пристрій для вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, А.В.Логвин, М.С.Скиданенко (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № u201009488; заявл. 29.07.2010; опубл. 25.02.2011, бюл. №4. *Здобувачем розроблено новий сепараційний пристрій.*
38. Пат. на корисну модель 60115 U Україна, МПК B01D3/26. Контактна тарілка / В.І.Склабінський, Р.О.Острога, К.К.Коробченко; заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № u201014061; опубл. 10.06.2011, бюл. №11. *Здобувачем розроблено новий масообмінно-сепараційний пристрій.*
39. Пат. на корисну модель 82976 U Україна, МПК (2013.01) B01D45/00 B01D45/04 (2006.01). Пристрій для вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, А.В.Логвин, О.В.Настенко, Д.В. Пономаренко (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № u201301444; заявл. 07.02.2013; опубл. 27.08.2013, бюл. №16. *Здобувачем розроблено новий сепараційний пристрій.*
40. Пат. на корисну модель 85952 U Україна, МПК B01D45/04 (2006.01). Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, О.В.Настенко, О.А.Сердюк (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № u201306402; заявл. 23.05.2013; опубл. 10.12.2013, бюл. №23. *Здобувачем розроблено новий спосіб сепарації.*
41. Пат. на корисну модель 88516 U Україна, МПК B01D45/04 (2006.01). Спосіб сепарації конденсацією / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, О.В.Настенко, О.А.Сердюк (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № u201309181; заявл. 22.07.2013; опубл. 25.03.2014, бюл. №6. *Здобувачем розроблено новий спосіб сепарації газоконденсатних систем.*
42. Пат. на корисну модель 98926 U Україна, МПК B01D45/04 (2006.01). Пристрій для вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, О.В.Настенко, Р.Ю.Усик (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № u201413067; заявл. 05.12.2014; опубл. 12.05.2015, бюл. №9. *Здобувачем розроблено новий сепараційний пристрій.*
43. Пат. на корисну модель №102445 U Україна, МПК B01D45/04 (2006.01). Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку / О.О.Ляпощенко, І.В.Павленко, О.В.Настенко, Р.Ю.Усик, М.М.Дем'яненко (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № u201505124; заявл.

25.05.2015; опубл. 26.10.2015, бюл. №20. *Здобувачем розроблено новий спосіб газодинамічної сепарації.*

44. Физическая модель формирования высокодисперсных систем в турбулентном потоке газа / [А.А.Ляпощенко, О.В.Настенко, А.В.Логвин, М.М.Аль Раммахи] // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2013». — Выпуск 1. Том 7. — Одесса. — 2013. — С.70-75. *Здобувачем розроблено модель формування газодисперсних систем.*

45. Склабінський, В.І. Сучасне газосепараційне обладнання — застосування та перспективи розвитку / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, А.В.Логвин // Тези доповідей III міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Хімія та сучасні технології». — Дніпропетровськ, 2007. — С.214. *Здобувачем сформульовано наукові основи прогнозування ефективності розділення газорідних потоків та методи оптимізаційного проектування обладнання.*

46. Склабінський, В.І. Високоєфективні газосепаратори для очищення біогазу від краплинної вологи на компресорних установках / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, А.В.Логвин // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: Матеріали П'ятої міжнародної науково-практичної конференції / Зб. Наук. статей. — Львів: ЛьВЦНТЕІ, 2009. — С.141-142. *Здобувачем доведено перспективи застосування методів інерційно-фільтруючої сепарації в біопаливних технологіях.*

47. Склабінський, В.І. Інерційно-фільтруюче сепараційне обладнання установок термохімічної переробки нафтових шламів нафтопромислових виробництв / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, А.В.Логвин // Збірник матеріалів I Міжнародного конгресу «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування». — Львів: Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2009. — С.65. *Здобувачем доведено перспективи застосування інерційно-фільтруючого обладнання для сепарації термолізних газів.*

48. Склабінський, В.І. Підвищення ефективності сепараційного обладнання установки низькотемпературної сепарації природного газу / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, А.В.Логвин // International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus. Special number: Матеріали V Міжнародної конференції «Стратегія качества в промышленности и образовании». — Болгария, Варна, 2009. — Т.1. — С.410-412. *Здобувачем за результатами фізичних і математичних моделювань модернізовано конструкцію трифазного сепаратора.*

49. Логвин, А.В. Визначення гідродинамічних показників інерційно-фільтруючих сепараторів за допомогою комп'ютерного моделювання та фізичного експерименту / А.В.Логвин, В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко // Матеріали четвертої міжнародної науково-практичної конференції «Наукові дослідження – теорія та експеримент '2009». Т.6. — Полтава: Вид-во «ІнтерГрафіка» 2009. — С.54-56. *Здобувачем поставлено задачі фізичних моделювань.*

50. Експериментальне дослідження гідродинамічних параметрів роботи інерційно-фільтруючих сепараторів / А.В.Логвин, М.М.Аль-Раммахі, О.О.Ляпощенко, В.І.Склабінський // International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus. Special number: Матеріали VII Міжнародної конференції «Стратегія качества в промышленности и образовании». — Болгария, Варна, 2011. — Т.3. — С.167-169. *Здобувачем поставлено задачі та проаналізовано результати експериментальних досліджень.*

51. Високоєфективні інерційно-фільтруючі газосепаратори для промислових установок комплексної підготовки газу газових та газоконденсатних родовищ / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, А.В.Логвин, М.М. Аль Раммахі // Тези міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку нафтогазового комплексу». — Полтава: ПолтНТУ, 2012. — С.131-134. *Здобувачем здійснено моделювання сепараційного обладнання CFD, MCA, DEM-методами.*

52. Physical conditions and mechanisms for separation condensate systems / [O.O.Lyaposchenko, O.V.Nastenko, A.V.Logvyn, M.M.Al-Rammahi] // International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus. Special number: Матеріали ІХ Міжнародної конференції «Стратегія якості в промисловості і освіті». — Болгарія, Варна, 2013. — Т.1. — С.81-83. *Здобувачем розроблено фізичну модель основних механізмів сепарації газоконденсатних систем.*
53. Liaposhchenko, O. Analysis of the Phase Equilibrium Conditions and the Impact of Coupled Heat and Mass Transfer on the Separation Process Efficiency in the Inertial – Filtering Gas Separator / O.Liaposhchenko, O.Nastenko // Хімія та хімічні технології: Матеріали ІІІ Міжнародної конференції молодих вчених ССТ-2013. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. — С.138-141. *Здобувачем розроблено фізичну модель процесу сепарації зі сполученням тепломасообміном.*
54. Ляпощенко, А.А. Проектування установок низькотемпературної переробки вуглеводнів з використанням програмних пакетів технологічних розрахунків / А.А.Ляпощенко, О.В.Настенко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей ХХІІ міжнародної науково-практичної конференції. — Харків: НТУ «ХПІ», 2014. — Ч.І. — С.289. *Здобувачем здійснено моделювання процесів сепарації, однократного випаровування та конденсації.*
55. Ляпощенко, А.А. Интегрированные технологии автоматизированного проектирования с динамическим моделированием работы сепарационного и теплообменного оборудования в составе промышленных установок и комплексов / А.А.Ляпощенко, О.В.Настенко // Прогрессивные технологии и процессы: Сборник научных статей Международной молодежной научно-технической конференции. — Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. — Т.1. — С.353-357. *Здобувачем розроблено методіку інтегрованого проектування сепараційного обладнання.*
56. Моделювання процесів сепарації та розробка методики розрахунку трифазного сепаратора / [О.О.Ляпощенко, І.В.Павленко, Р.Ю.Усик, М.М.Дем'яненко] // Інноваційні енерготехнології: Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції. — Одеса: Одеська національна академія харчових технологій, 2015. — С.241-245. *Здобувачем розроблено основні принципи та алгоритм інженерного розрахунку фазних розділювачів.*
57. Solution of the Navier–Stokes Equations for the Processes of Inertial Gas Dynamic Separation in the Curvilinear Channels / [V.Sklabinskyi, O.Liaposchenko, I.Pavlenko, M.Demianenko] // Праці XVII Міжнародного симпозиуму «Методи дискретних особливостей в задачах математичної фізики» (МДОЗМФ-2015): збірник наукових праць. — Харків: Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна, 2015. — С.232-235. *Здобувачем отримано аналітичний розв'язок рівнянь Нав'є-Стокса для течії у плоскому криволінійному каналі.*
58. Olha Nastenko. Mathematical Modelling of Separation Process by Coupled Heat Transfer in the Inertial–Filtering Gas Separator-Condenser / Olha Nastenko, Oleksandr Liaposhchenko, Lubomira Broniarz-Press // Materiały konferencyjne: XI Ogólnopolska konferencja przepływów wielofazowych, Polska. — Gdańsk: Politechnika Gdańska, 2015. — S.29-30. *Здобувачем розроблено алгоритм математичних моделювань.*
59. Применение многофункционального блочного нефтегазодоразделителя типа "HEATER-TREATER" для промышленной подготовки нефти и газа / [А.А.Ляпощенко, О.В.Настенко, В.М.Маренок та ін.] // Технологии XXI века: Сборник тезисов по материалам 21й международной научной конференции. Ч.1. — Сумы: СНАУ, 2015. — С.109-110. *Здобувачем розроблено та впроваджено дослідно-промисловий зразок.*
60. Павленко И.В. Исследование вынужденных колебаний отбойных элементов газодинамического сепаратора / И.В.Павленко, А.А.Ляпощенко, М.В.Демьяненко // Молодой инженер — основа научно-технического прогресса: Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции. — Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2015 — С.262-265. *Здобувачем розроблено спосіб газодинамічної сепарації, проаналізовано результати моделювань.*

АНОТАЦІЯ

Ляпощенко О.О. Теоретичні основи процесів інерційно-фільтруючої сепарації. — На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.08 — процеси та обладнання хімічної технології. — Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2016.

Дисертація являє собою теоретичне узагальнення результатів досліджень автора і присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми, сутність якої полягає в створенні теоретичних основ процесів інерційно-фільтруючої сепарації і науково обґрунтованих методів розрахунку основних технологічних параметрів та характеристик інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв, в яких поєднані принципи одночасної взаємодії інерційних та фільтруючих сепараційних елементів, чим досягається зниження гідравлічного опору та підвищення ефективності сепарації у широких діапазонах навантажень та співвідношення фаз.

Аналітично та чисельно розв'язано системи рівнянь руху і нерозривності газового потоку для окремого випадку плоского плинину в криволінійному каналі, рівнянь руху дисперсних часток (краплин) в турбулентному газодисперсному потоці, ламінарного руху вловленої рідини в плівці, що стікає по стінках каналу та в шарі волокнистого фільтру, виходячи з умов усталеного руху та рівноваги (балансу сил) на міжфазній поверхні, що визначають особливості взаємодії плівки сепарованої рідини з газовим потоком в криволінійних інерційно-фільтруючих сепараційних каналах, чим закладено теоретичні основи теорії інерційно-фільтруючої сепарації. Розвинута континуальна модель криволінійної течії газодисперсного потоку дозволяє розрахунковим методом визначити траєкторії руху дисперсних часток, розподіл їх по розмірах і відповідно здійснити оптимізаційне геометричне профілювання криволінійних каналів, визначити зони доцільного розташування, форму та розміри фільтруючих елементів, оцінити ефективність сепарації після кожної послідовної криволінійної ділянки (ступеня сепарації) інерційно-фільтруючого сепараційного каналу.

Ключові слова: теоретичні основи, гідромеханічні процеси, механізми інерційно-фільтруючої сепарації, гідравлічний опір, ефективність сепарації.

АННОТАЦИЯ

Ляпощенко А.А. Теоретические основы процессов инерционно-фильтрующей сепарации. — На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.17.08 — процессы и оборудование химической технологии. — Национальный университет «Львовская политехника», Львов, 2016.

Диссертация представляет собой теоретическое обобщение результатов исследований автора и посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы, суть которой заключается в создании теоретических основ процессов инерционно-фильтрующей сепарации и научно обоснованных методов расчета основных технологических параметров и характеристик инерционно-фильтрующих

сепарационных устройств, в которых объединены принципы одновременного взаимодействия инерционных и фильтрующих сепарационных элементов, чем достигается снижение гидравлического сопротивления и повышение эффективности сепарации в широких диапазонах нагрузок и соотношения фаз.

Аналитически и численно решены системы уравнений движения и неразрывности газового потока для отдельного случая плоского течения в криволинейном канале, уравнений движения дисперсных частиц (капель) в турбулентном газодисперсном потоке, ламинарного движения уловленной жидкости в стекающей пленке по стенкам канала и в слое волокнистого фильтра, исходя из условий установившегося (стационарного) движения и равновесия (баланса сил) на межфазной поверхности, которые определяют особенности взаимодействия пленки сепарированной жидкости с газовым потоком в криволинейных инерционно-фильтрующих сепарационных каналах, чем заложены теоретические основы теории инерционно-фильтрующей сепарации. Получившая развитие континуальная модель криволинейного течения газодисперсного потока позволяет расчетным методом определить траектории движения дисперсных частиц, распределение их по размерам и соответственно осуществить оптимизационное геометрическое профилирование криволинейных каналов, определить зоны рационального расположения, форму и размеры фильтрующих элементов, прогнозировать эффективность сепарации после каждого последовательного криволинейного участка (ступени сепарации) инерционно-фильтрующего сепарационного канала.

Ключевые слова: теоретические основы, гидромеханические процессы, механизмы инерционно-фильтрующей сепарации, гидравлическое сопротивление, эффективность сепарации.

SUMMARY

Liaposhchenko O.O. Theoretical foundations of the processes of inertial-filtering separation. — On the rights of manuscript.

Thesis for the scientific degree of Doctor of Science in Engineering, specialty 05.17.08 — processes and the equipment of chemical technology. — Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2016.

The thesis represents a theoretical generalization of author's results of research and is devoted to solving an urgent scientific and applied problem that concerns the creation of theoretical foundations of processes of the inertial-filtering separation, as well as science-based methods of calculating the basic technological parameters and characteristics of the inertial-filtering separation devices, which combine the principles of simultaneous interaction of inertial and filtering separation elements. Thus, the reduction of hydraulic resistance and rising the separation efficiency in a wide range of loads and phases relation are achieved.

The perspective directions of the organization of motion and interaction of two-phase flows are defined. It has led to the invention of new ways of the inertial-filtering separation and development of a new separate class of the inertial-filtering separation devices, for which the basic laws of processes of gravitational and inertial settling, as well as trapping the dispersed particles are determined by filtration mechanisms on filter fibers

and trapped liquids in the curvilinear inertial-filtering separation channels. The task of the analytical and numerical solution of mathematical models from the system of motion equations has been solved, as well as the equation of continuity of a gas stream for a special case of the flat flow in the curvilinear channel, equations of motion of dispersible particles (droplets) in the turbulent gas-dispersion flow, laminar motion of trapped liquids in the film that flows on the wall of the channel and in the layer of fibrous filter, based on the conditions of steady motion and equilibrium (force balance) on the boundary surface, define features of the interaction of film separated liquids film with a gas stream in the curvilinear inertial-filtering separation channels, than the theoretical foundation of the theory of the inertial-filtering separation. The developed continual model of curved gas-dispersion flow allows using a calculation method to determine the motion trajectory of dispersible particles, their distribution by the sizes and therefore to carry out an optimization geometric profiling of curvilinear channel, as well as to determine the efficient location zones, form and sizes of filtering elements and to estimate the effectiveness of separation after each serial curvilinear areas (degree of separation) of inertial-filtering separation channel. The problem of the analysis of coupled interphase heat and mass transfer influence on the processes of the inertial-filtering separation of multicomponent gas-condensate mixtures are considered and obtained the further development of the physical model of formation and phase equilibrium of the highly refined gas and condensate system in the turbulent gas flow that includes the effect of phase transformation and drop coalescence of condensed fluid on the efficiency of processes of inertial-filtration separation with condensation.

The scientifically based practical recommendations for the design and engineering methods for calculating the gas-dynamic separators for the purpose to enhance separation efficiency and reduce the hydraulic resistance with determination of the optimal design parameters of inertial-filtering separation elements are developed. The program and technique of experimental-industrial testing new inertial-filtering separators and separation unit blocks are developed. According to the results of research and proofing of exposed and experimental-industrial testing the inertial-filtering separators, their main hydraulic and separation indicators are determined that confirmed the high technical characteristics of the proposed equipment. The received scientific results in dissertation work and practical recommendations are implemented in production at the engineering plants, chemical industry enterprises, as well as oil and gas industry.

Keywords: theoretical foundations, hydromechanical processes, mechanisms of inertial-filtering separation, hydraulic resistance, efficiency of separation.

Підписано до друку 02.11.2016 р.
Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 2,1. Обл.-вид. арк. 1,9. Тираж 100 пр. Зам. № 890.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.