

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ПАВЛЕНКО ІВАН ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 66.084:66.021.1(043.3)

**НАУКОВО-ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВІБРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ
У ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМАХ**

Спеціальність 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Суми – 2020

Дисертація є кваліфікаційною науковою працею на правах рукопису.

Робота виконана на факультеті технічних систем та енергоефективних технологій Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор
Склабінський Всеволод Іванович,
Сумський державний університет
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри процесів та обладнання
хімічних і нафтопереробних виробництв.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Атаманюк Володимир Михайлович,
Національний університет «Львівська
політехніка» Міністерства освіти і науки
України,
завідувач кафедри хімічної інженерії,
м. Львів;

доктор технічних наук, доцент
Щербина Валерій Юрійович,
Національний технічний університет
України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського» Міністерства
освіти і науки України,
професор кафедри хімічного, полімерного
і силікатного машинобудування, м. Київ;

доктор технічних наук, професор
Цейтлін Мусій Абрамович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри хімічної техніки
та промислової екології, м. Харків.

Захист дисертації відбудеться 2 липня 2020 р. об 11 год 00 хв на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04 в Сумському державному університеті за адресою: 40007, вул. Римського-Корсакова, 2, корп. Ц, ауд. 204.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, Україна, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, та на сайті спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04 за електронною адресою: <https://sumdu.edu.ua/uk/science/science-info/scientific-infrastructure/specialized-council/permanent-specialized-council/102-55-051-04.html>.

Автореферат розісланий 1 червня 2020 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04



І. Ю. Аблєєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток виробництва в галузі хімічної технології відбувається за рахунок використання енергоємного обладнання, в якому інтенсифікація основних технологічних процесів здійснюється шляхом застосування вібраційного впливу. Накладені вібрації використовуються для підвищення ефективності технологічних процесів у машинах і апаратах хімічної промисловості, а також для організації керованої дії на масообмінні процеси (екстракції, розчинення, сорбції тощо). Водночас теоретичні дослідження ефектів, пов'язаних із впливом накладених вібрацій на процеси сепарації газокраплинних систем, грануляції плавів, пневмокласифікації механічних сумішей, є недостатньо вивченими з точок зору як дослідження механізмів впливу вібрацій на технологічний процес, так і визначення поверхні розділення фаз. Існуючі математичні моделі не враховують фазового стану та ймовірного розподілу частинок дисперсної фази за розмірами.

Проектування апаратів хімічної технології, призначених для розділення гетерогенних систем у сепараційних і класифікаційних пристроях, забезпечення монодисперсного складу отримуваної сировини у віброгрануляторах передбачають визначення гідродинамічних характеристик потоків. На інтенсивність основних гідромеханічних і тепломасообмінних процесів істотно впливають також вторинні процеси (вторинне подрібнення крапель дисперсної фази, хвилеутворення і бризковинесення, осадження, контактування з основною фазою тощо), що відбуваються на нерозрахункових режимах роботи обладнання або на виході з апарата. Водночас існуючі моделі подрібнення краплинної рідини, що спираються переважно на критеріальні рівняння, не дозволяють визначати характеристики подрібнення залежно від параметрів вібраційного впливу. Невирішеною також є зв'язана задача про стікання плівки вловленої рідини в сепараційному каналі під час її взаємодії з газокраплинним потоком із конвективним теплообміном на охолоджуваних поверхнях. Потребують подальшого розвитку математичні моделі руху рідини в елементах сепараційних пристроїв й апаратів випарного охолодження, які б ураховували нестационарний характер і пояснювали вплив накладених вібрацій для інтенсифікації процесів фільтрації та відведення вловленої краплинної рідини із сепараційного каналу. Також потребують подальшого розвитку науково-теоретичні основи дослідження процесу передавання енергії між елементами віброгранулятора, що вимагає створення математичної моделі, яка б ураховувала динамічні характеристики рідинного шару.

Таким чином, існує необхідність у розробленні науково-теоретичних основ вібраційних процесів у гетерогенних системах, що потребує проведення ґрунтовних наукових досліджень, які сприятимуть удосконаленню існуючих і створенню нових високоефективних вібраційних технологій для хімічної промисловості.

Дослідження впливу вібрацій на гідромеханічні та тепломасообмінні процеси в гетерогенних системах відносять до фундаментальних проблем гідромеханіки і теоретичних основ процесів тепломасопередачі, оскільки

дозволяють на їх основі вирішити ряд інших науково-технічних завдань, які є актуальними під час моделювання процесів та проектування обладнання хімічної технології.

У зв'язку з вищезазначеним тема дисертаційної роботи є актуальною, має важливе наукове та практичне значення, оскільки спрямована на розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми, пов'язаної зі створенням науково-теоретичних основ вібраційних процесів сепарації газокраплинних систем і віброгрануляції плавів, а також гідромеханічних процесів фільтрації та пневмокласифікації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи відповідає Переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 942 від 07.09.2019 р., Положенням Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010–2020 рр., затвердженої Постановою Кабінету Міністрів України № 243 від 01.03.2010 р., а також пріоритетним напрямом розвитку науки і техніки в Україні відповідно до пп. 1, 3, 6 ст. 3 Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» і стратегічним пріоритетним напрямом інноваційної діяльності в Україні на період 2011–2021 рр.

Дисертаційна робота виконана на факультеті технічних систем та енергоефективних технологій Сумського державного університету відповідно до плану держбюджетних науково-дослідних робіт, пов'язаних із темами «Гідродинамічні показники двофазних потоків тепломасообмінного, грануляційного та сепараційного обладнання» (номер держреєстрації 0115U002551), «Розробка та впровадження енергоефективних модульних сепараційних пристроїв для нафтогазового та очисного обладнання» (номер держреєстрації 0117U003931), «Створення нових гранульованих матеріалів для ядерного палива та каталізаторів в активному гідродинамічному середовищі» (номер держреєстрації 0120U102036) згідно з науково-технічною програмою Міністерства освіти і науки України; у рамках госпдоговірних науково-дослідних робіт Сумського державного університету «Розробка підігрівача-деемульсатора типу «HEATER-TREATER» установки підготовки нафти» (№ 51.18-04.15.СП; замовник – ПАТ «Укрхімпроект», м. Суми), «Теоретичні основи процесів стиснення, теплообміну і сепарації в поршневих компресорних машинах і установках» (№ 51.18-20196.СП/03; замовник – ТОВ «Пром-Енерго Продукт», м. Харків); у рамках індивідуального міжнародного гранту «Identification of Parameters for Technological Equipment using Artificial Neural Networks» (01.02–30.04.2018 р., Національна програма Словацької Республіки, Технічний університет м. Кошице, м. Прешов, Словаччина).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення науково-теоретичних основ вібраційних процесів у гетерогенних системах, підвищення ефективності розділення гетерогенних систем та

отримання монодисперсного краплинного середовища шляхом інтенсифікації та вдосконалення процесів у вібросепараторах, пневмокласифікаторах і віброгрануляторах.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити **такі завдання**:

– провести аналіз та узагальнення теоретичного опису гідродинамічних процесів з урахуванням впливу вібрацій на структуру гетерогенних систем у сепараційному, класифікаційному і грануляційному обладнанні з метою підвищення їх ефективності та обґрунтувати напрям наукових досліджень;

– забезпечити науково-теоретичне обґрунтування процесів вібраційної сепарації, пневмокласифікації газодисперсних потоків і віброгрануляції плавів, а також теоретично обґрунтувати фізичні процеси, зокрема вибіркової сепарації та віброакустичної коагуляції, для практичної реалізації можливостей інтенсифікації гідромеханічних процесів хімічної технології за рахунок накладання коливань;

– створити концептуальні основи теорії гідроаеропружної взаємодії газокраплинного потоку з деформівними елементами сепараційних пристроїв;

– розробити математичну модель вторинного подрібнення краплинної рідини під дією вібраційного впливу;

– уточнити математичну модель визначення питомої поверхні контакту фаз у процесі сепарації двофазних систем;

– розробити науково-теоретичні основи дослідження процесу стікання плівки вловленої рідини в каналі сепараційного пристрою під час її взаємодії з газокраплинним потоком зі сполученим конвективним теплообміном на охолоджуваних поверхнях контактних елементів;

– удосконалити математичну модель нестационарного капілярного підйому рідини з метою обґрунтування можливості застосування накладених вібрацій для інтенсифікації процесу фільтрації та відведення вловленої краплинної рідини із сепараційного каналу;

– створити теоретичні основи оцінювання параметрів процесів сепарації та пневмокласифікації газодисперсних систем;

– створити математичну модель процесу передавання енергії від механічного збудника коливань до плаву рідини у вібраційному грануляторі та розробити методику оцінювання параметрів процесу, а також дослідити механізм вібраційного впливу на рідину та струмені рідини в процесі віброгрануляції та встановити взаємозв'язок між вібраційними характеристиками і дисперсним складом отримуваних крапель (гранул);

– розробити та впровадити енергоефективні модульні сепараційні пристрої, що реалізують вібраційно-фільтрувальний принцип розділення, і апарати для пневмокласифікації аеродисперсних систем та розширити сфери застосування запропонованих науково-теоретичних і практичних підходів.

Об'єкт дослідження – процеси вібраційно-фільтрувальної сепарації зі сполученим тепломасообміном, пневмокласифікації газодисперсних систем і віброгрануляції плавів.

Предмет дослідження – гідродинаміка і тепломасообмін у пристроях із накладанням коливань на структуру дисперсних потоків у процесі сепарації із супутньою фільтрацією і сполученим конвективним теплообміном на охолоджуваних поверхнях та в процесі подрібнення струменів плаву рідини для отримання однорідного дисперсного потоку крапель (гранул).

Методи досліджень. На емпіричному рівні наукових досліджень застосовували методи проведення фізичних експериментів (експериментальної гідромеханіки, прямого спостереження, оптичного мікрофотографування з подальшим програмним обробленням із застосуванням методу «Particle Image Velocimetry» і програмного продукту MatLab) та чисельного моделювання (скінченноелементний аналіз і методи обчислювальної гідродинаміки в програмному комплексі ANSYS з подальшим обробленням у системі комп'ютерної алгебри MathCAD). Математичні моделі вібраційних процесів у гетерогенних системах на теоретичному рівні досліджували на основі методів розв'язання алгебраїчних і диференціальних рівнянь та їх систем (послідовних наближень, розділення змінних Фур'є, комплексних амплітуд, гармонічної лінеаризації, перетворення Лапласа, нескінченних степеневих рядів, Рунге – Кутти та Булірша – Штера). Аналіз одержаних закономірностей здійснювали із застосуванням методів математичного аналізу. Оцінювання параметрів математичних моделей за результатами чисельних та експериментальних досліджень виконували за допомогою квазілінійного регресійного аналізу із застосуванням методів Монте Карло, найменших квадратів, простих ітерацій та штучних нейронних мереж.

Наукова новизна одержаних результатів

Вперше:

1. Створено науково-теоретичні основи ідентифікації (оцінювання) параметрів моделі нестационарного руху рідини в каналі з вібрувальною стінкою на основі математичної моделі гідроаеропружної взаємодії газодисперсного потоку з динамічними відбійними елементами із застосуванням квазілінійного регресійного аналізу та засобів штучного інтелекту, зокрема штучних нейронних мереж.

2. Створено науково-теоретичні основи дослідження процесу стікання плівки вловленої рідини в сепараційному каналі під час її взаємодії з газокраплинним потоком зі сполученим конвективним теплообміном на охолоджуваних поверхнях контактних елементів. У результаті одержане поле температурного градієнта за товщиною плівки залежно від чисел Нуссельта, Прандтля і Рейнольдса.

3. Теоретично обґрунтоване числове значення критичного числа Вебера в діапазоні, прогнозованому попередніми дослідниками, на основі створеної математичної моделі вторинного подрібнення краплинної рідини та одержаного аналітичного виразу для часу подрібнення.

4. Створено наукові основи теорії гратчастих структур на основі дискретної та квазіконтинуальної імовірнісних моделей, що дозволяє досліджувати процес відведення краплинної рідини з фільтрувальних

елементів сепараційних пристроїв і визначати розподіл концентрації рідини за товщиною фільтрувального шару.

Удосконалено:

5. Математичну модель визначення поверхні контакту фаз у процесах сепарації, грануляції розпилюванням і тепломасообміну, що враховує фазовий стан та імовірнісний розподіл частинок дисперсної фази за розмірами.

6. Математичну модель процесу передавання енергії від механічного збудника коливань (актуатора) до плаву рідини у віброгрануляторі, що враховує пружно-демпфувальні характеристики рідинного шару, а також розвинено науковий підхід до вибору механічного привода обертового віброгранулятора шляхом дослідження вібраційного впливу на розпад струменів рідини з отриманням монодисперсних крапель та подальшим формуванням гранул.

Набули подальшого розвитку:

7. Математичні моделі процесу вібраційного впливу на гідромеханічні процеси сепарації газодисперсних систем в апаратах, в яких поєднані принципи одночасної взаємодії вібраційних і фільтрувальних елементів.

8. Математична модель механізму та процесу подрібнення краплинної рідини. У результаті встановлено граничні значення характеристик вібраційного впливу на дисперсний склад крапель при грануляції плаву.

9. Математичні моделі нестационарного руху газодисперсного потоку в пневматичному класифікаторі, а також розподілу концентрації частинок сипкого матеріалу у виділеному об'ємі зваженого шару, що дозволило вдосконалити теорію пневмокласифікації газодисперсних систем шляхом одержання полів швидкостей і траєкторій основної та дисперсної фаз, а також створити теоретичні основи оцінювання параметрів гідромеханічних процесів за даними експериментальних досліджень.

10. Методи теоретичних та експериментальних досліджень процесів грануляції органічних суспензій, вимивання поживних речовин із капсульованих мінеральних добрив та розпилення рідини з поверхнево-активними полімерними домішками на основі поширення закономірностей, одержаних у результаті розгляду процесів хімічної технології в гетерогенних системах.

Практичне значення одержаних результатів. Створено методологію проектування апаратів хімічної технології на основі комплексного застосування методів аналітичної та обчислювальної механіки рідини і газу, засобів штучного інтелекту та теорії ідентифікації параметрів. На основі розробленої теорії запропоновано нові енергоефективні модульні сепараційні пристрої для вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідинного потоку, що реалізують вібраційно-фільтрувальний принцип розділення, захищені патентами України на корисну модель (№ 102445, № 111039, № 130464), принцип роботи яких ґрунтується на аеропружній взаємодії газодисперсного потоку з деформівними функціональними елементами пристрою, що забезпечує автоматичну зміну опору сепараційного елемента і сприяє збільшенню розмірів краплинної рідини за рахунок

коагуляції/коалесценції та осадженню з подальшим відведенням із сепараційного каналу. Запропоновано узагальнені методики розрахунку вібраційно-фільтрувальних сепараційних блочно-модульних пристроїв та оцінювання критичних швидкостей газорідного потоку і відповідних частот флатера відбійних елементів динамічних сепараційних пристроїв. Створено методику розрахунку ефективності сепараційних пристроїв на основі моделювання стікання плівки вловленої рідини на поверхні відбійних елементів під час її взаємодії з газорідним потоком з урахуванням супутнього конвективного теплообміну при сепарації з конденсацією на охолоджуваних поверхнях розділення газорідної суміші. Запропоновано методику визначення ефективності фільтрації на основі моделі нестационарного капілярного руху рідини та із застосуванням методів обчислювальної гідромеханіки і оцінювання параметрів. Створено методику розрахунку апаратів для пневмокласифікації аеродисперсних систем з урахуванням нерівномірного розподілу концентрації частинок сипкого матеріалу у виділеному об'ємі зваженого шару. Вдосконалено методику визначення поверхні контакту фаз у процесах сепарації, грануляції розпилюванням і тепломасообміну. Запропоновано застосування накладених вібрацій для інтенсифікації процесу фільтрації та відведення вловленої краплинної рідини із сепараційного каналу. Створено методику оцінювання жорсткісних та демпфувальних характеристик взаємодії між елементами віброгранулятора. Запропоновано нові, перспективні шляхи застосування накладених вібрацій на робочі процеси в машинах і апаратах хімічної технології. Удосконалено способи та пристрої сепарації краплинної рідини з газорідного потоку і розроблено методику визначення необхідної кількості блоків сепараційного пристрою за ефективністю вловлювання плівкової рідини, а також узагальнену методику визначення ефективності гідромеханічних і тепломасообмінних процесів.

Одержані результати дисертаційного дослідження стали науковою основою розроблення нових та удосконалення існуючих технологій промислового видобутку, підготовки до транспортування та переробки нафти і газу, які передані для впровадження у виробничу діяльність ТОВ «Пром-Енерго Продукт» (акт впровадження від 15.11.2019 р.).

Наукові та практичні результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес Сумського державного університету під час підготовки студентів до участі у Всеукраїнських конкурсах студентських наукових робіт у галузі «Нафтова та газова промисловість» (акт впровадження від 21.12.2015 р.) і проведення навчального тренінгу для керівного складу та провідних фахівців з нафтогазових технологій ПрАТ «Смарт-Холдинг», групи «Smart Energy», ТОВ «Пром-Енерго Продукт» і ПрАТ «Укргазвидобуток» (акт впровадження від 12.12.2019 р.).

Особистий внесок здобувача полягає в критичному аналізуванні стану наукової проблеми, обґрунтуванні основної ідеї та формулюванні теми дисертаційного дослідження, розробленні основних наукових положень, програм і методик фізичних та математичних моделювань, узагальненні

одержаних достовірних наукових результатів і формулюванні висновків, розробленні науково обґрунтованих практичних рекомендацій та алгоритмів чисельного розрахунку, а також в упровадженні результатів дисертаційного дослідження. Внесок автора в працях, опублікованих у співавторстві, наведений у списку праць за темою дисертації.

Апробація результатів досліджень. Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних наукових конференціях, симпозіумах і семінарах: «Інноваційні енерготехнології» (м. Одеса, 07–11.09.2015 р.); «Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу» (м. Івано-Франківськ, 16–20.05.2016 р.); «Прикладні науково-технічні дослідження» (м. Івано-Франківськ, 05–07.04.2017 р., 03–05.04.2018 р., 03–05.04.2019 р.); «Praktyczne Aspekty Inżynierii Chemicznej» (м. Познань, 23.06.2017 р., 16–17.09.2019 р.); «Герметичність, вібронадійність і екологічна безпека насосного і компресорного обладнання» (м. Суми, 05–08.09.2017 р.); «Machines, Equipment and Materials for Oil and Gas Production Increase» (м. Івано-Франківськ, 24–27.04.2018 р.); «International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange» (м. Суми, 12–15.06.2018 р.; м. Луцьк, 11–14.06.2019 р.); «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (м. Краматорськ, 31.10–02.11.2018 р.); «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Київ, 22–25.10.2019 р.); «Ogólnopolskie Seminarium Chemii Bioorganicznej, Organicznej i Biomateriałów» (м. Познань, 07.12.2019 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 45 наукових працях, з яких 2 монографії; 24 статті, зокрема, 7 статей у наукових фахових виданнях із переліку МОН України, 17 статей у виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами Scopus та/або Web of Science Core Collection; 14 публікацій у матеріалах та працях міжнародних конференцій; 3 патенти України на корисну модель; 2 авторські свідоцтва.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 476 сторінок, з яких основного тексту – 311 сторінок. Дисертаційна робота містить 2 таблиці, 47 рисунків, 616 найменувань списку використаних джерел на 61 сторінці та 26 додатків на 72 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами й темами, наукову новизну та практичну значущість одержаних результатів, а також особистий внесок здобувача в проведеному дослідженні та відповідних наукових публікаціях.

У першому розділі «Аналіз теоретичних та практичних проблем дослідження гідродинамічних, тепломасообмінних і вібраційних процесів у

гетерогенних системах» проаналізовано наукові праці за тематикою дисертаційної роботи. Зокрема, розглянуто гідродинамічні особливості багатофазних потоків і можливість інтенсифікації процесів сепарації гетерогенних систем за рахунок накладання вібраційного впливу. Проаналізовано вібраційні процеси в гідродинамічних і масообмінних процесах. Установлено, що вібрація відіграє особливу роль у процесах сепарації, перемішування і транспортування сумішей. Акцентовано увагу на дослідженні тиску в зазорі між вібрувальною пластиною і нерухомою стінкою для підвищення інтенсивності робочого процесу у віброгрануляційному обладнанні. Приділена увага дослідженню гідроаеропружної взаємодії елементів сепараційних пристроїв із потоком. Розглянуто явище турбулентної дифузії та осадження, вібраційного зважування. Приділено увагу процесу відведення вловленої рідини та проаналізовано моделі стікання плівки. Проаналізовано способи визначення поверхні контакту фаз і сфери застосування результатів дослідження капілярного підйому вловленої рідини.

Спираючись на критичний огляд науково-технічної літератури, наведений у першому розділі, встановлений перелік невирішених наукових проблем, пов'язаних із дослідженням вібраційного впливу на гетерогенні системи в процесах гідромеханіки, фільтрування, грануляції, класифікації тощо, сформульовані мета й завдання дослідження, а також обрані об'єкт та предмет дослідження. У результаті обґрунтовано, що обрана тема дисертаційної роботи є актуальною, а запропоновані мета і завдання дослідження мають наукову новизну та практичну значущість.

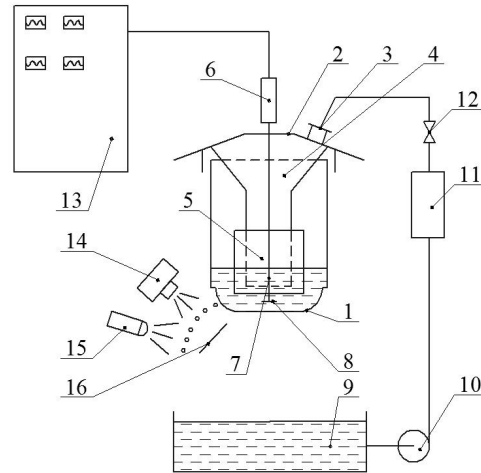
У другому розділі «Методологія наукових досліджень» описано методологію проведення дисертаційного дослідження. Для виконання дисертаційної роботи обрано сучасні методи аналітичного й імітаційного моделювань та експериментальних досліджень. Водночас за основу створення математичних моделей обрано теоретичну та обчислювальну гідродинаміку, теорію тепломасообміну, теорію коливань і гідроаеропружності в поєднанні з методами теорії оцінювання параметрів.

Розроблено методики проведення числових та експериментальних досліджень і наведено результати чисельного моделювання процесів сепарації та експериментальних досліджень поверхні розділення фаз, капілярного підйому рідини, пневмокласифікації гранульованого матеріалу та вібраційної грануляції. Зокрема, зовнішній вигляд і схема експериментального стенда, а також системи керування та вимірювання для дослідження гідромеханічних процесів віброгрануляції наведені на рисунках 1–3.

Для підтвердження достовірності результатів дослідження запропоновано використання методів оцінювання параметрів математичних моделей нестационарних, зокрема вібраційних гідромеханічних і тепломасообмінних процесів за результатами експериментальних досліджень із комплексним застосуванням квазілінійного регресійного аналізу та засобів штучного інтелекту (рис. 4).

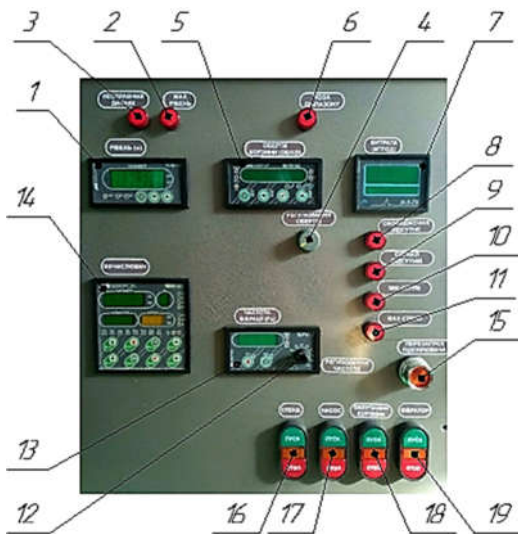


а

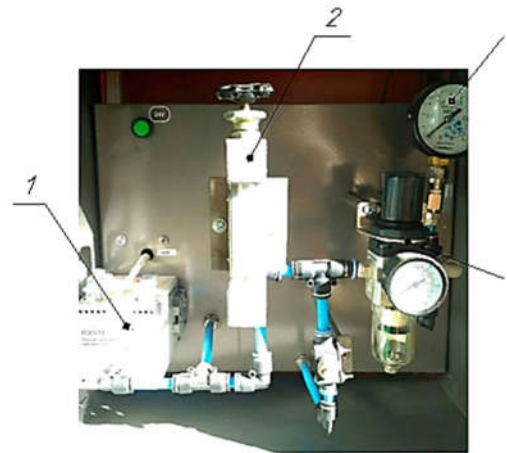


б

1 – корзина; 2 – корпус; 3 – патрубок; 4 – колектор; 5 – фільтрувальний елемент; 6 – електромагнітний збудник коливань (актуатор); 7 – шток; 8 – диск; 9 – буферна ємність; 10 – насос; 11 – витратомір; 12 – вентиль; 13 – шафа керування; 14 – пристрій фотофіксації; 15 – стробоскоп; 16 – екран
Рисунок 1 – Зовнішній вигляд (а) і схема (б) експериментального стенда



1–3 – індикатори рівня; 4–6 – регулювання обертів корзини; 7 – індикатор витрат рідини; 8–11 – індикатори; 12, 13 – регулювання частоти; 14 – обчислювач; 15 – передзапуск підсилювача; 16–19 – пуск систем
Рисунок 2 – Пульт керування



1 – перетворювач;
2 – витратомір; 3 – манометр;
4 – фільтр-регулятор
Рисунок 3 – Пневматична система

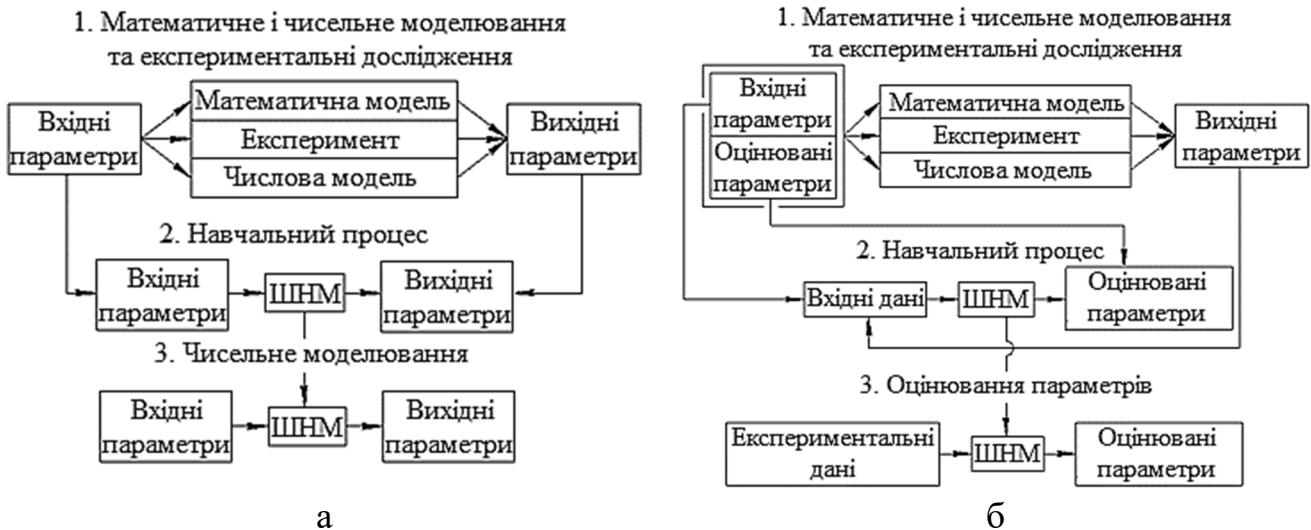


Рисунок 4 – Схеми комплексного застосування засобів математичного й чисельного моделювань і експериментальних досліджень для розв’язання прямої (а) та оберненої (б) задач наукового дослідження

У результаті запропоновано загальний науково-методологічний підхід для дослідження процесів хімічної технології з комплексним застосуванням аналітичних і чисельних методів дослідження та засобів штучного інтелекту.

У **третьому розділі** «Науково-теоретичні основи вібраційних процесів сепарації газодисперсних систем» викладено науково-теоретичні основи вібраційно-фільтрувальної сепарації газодисперсних систем і віброгрануляції плавів. Зокрема, досліджено гідродинаміку газорідного потоку в плоскому каналі з вібрувальною стінкою (рис. 5).

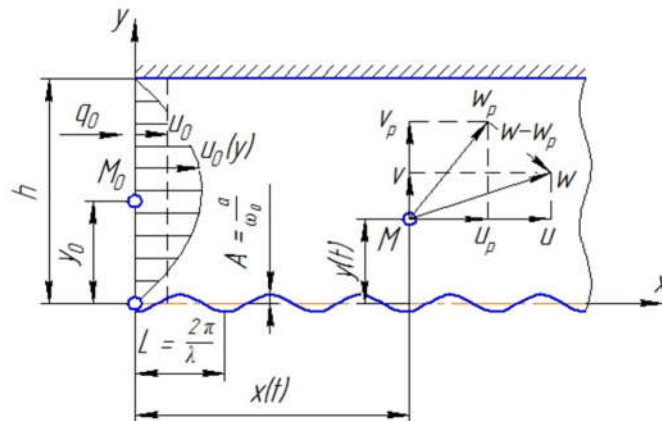


Рисунок 5 – Розрахункова схема дослідження гідродинаміки потоку

У результаті одержано аналітичні вирази для компонентів швидкості:

$$\begin{cases} u = \frac{6y}{h^3} (h - y) \left[q_0 + \frac{a}{\lambda} (1 - \cos \lambda x) \sin \omega_0 t \right], \\ v = \frac{a}{h^3} (h - y)^2 (2y + h) \sin \lambda x \sin \omega_0 t. \end{cases} \quad (1)$$

Досліджено рух газодисперсного турбулізованого потоку в каналі з вібрувальною стінкою. У результаті одержано аналітичні вирази для осереднених компонент швидкості:

$$\begin{aligned}\bar{u} &= u_0 + \frac{6\kappa_1 a}{\lambda h} \left[\sin \omega_0 t - \frac{1}{2} \sin \left(1 - \frac{1}{Ho} \right) \omega_0 t - \frac{1}{2} \sin \left(1 + \frac{1}{Ho} \right) \omega_0 t \right], \\ \bar{v} &= \frac{\kappa_2 a}{2} \left[\cos \left(1 - \frac{1}{Ho} \right) \omega_0 t - \cos \left(1 + \frac{1}{Ho} \right) \omega_0 t \right].\end{aligned}\quad (2)$$

Одержано координати локальних зон мінімуму тиску

$$x_n = \frac{1}{\lambda} \left(\arccos \frac{1}{1 + \lambda^2 h^2 / 8} + 2\pi n \right) \quad (n \in Z) \quad (3)$$

та встановлено, що відповідний крок $(x_{n+1} - x_n)$ дорівнює довжині хвилі $L = 2\pi/\lambda$ вібраційного впливу на газокраплинний потік, що є підтвердженням можливості застосування накладених вібрацій для подальшої вібраційної коагуляції краплинної рідини з метою інтенсифікації процесу газодинамічної сепарації двофазних систем.

Також створено модель руху краплинної рідини в газовому потоці за умов накладання вібраційного впливу. У результаті одержано аналітичні залежності для поля швидкості частинок дисперсної фази

$$\begin{cases} u_p = u_0 + A_2 \sin(\omega_0 t - \varphi_2) - A_3 \sin[(\omega_0 - \lambda u_0)t - \varphi_3] - \\ \quad - A_4 \sin[(\omega_0 + \lambda u_0)t - \varphi_4], \\ v_p = B_3 \cos[(\omega_0 - \lambda u_0)t - \varphi_3] - B_4 \cos[(\omega_0 + \lambda u_0)t - \varphi_4] - gt \end{cases} \quad (4)$$

і встановлено, що відносними траєкторіями частинок є фігури Ліссажу.

У результаті застосування ймовірнісного підходу (рис. 6 а) одержано геометричні характеристики зливних жолобів, розміщених на стаціонарній стінці сепараційного каналу.

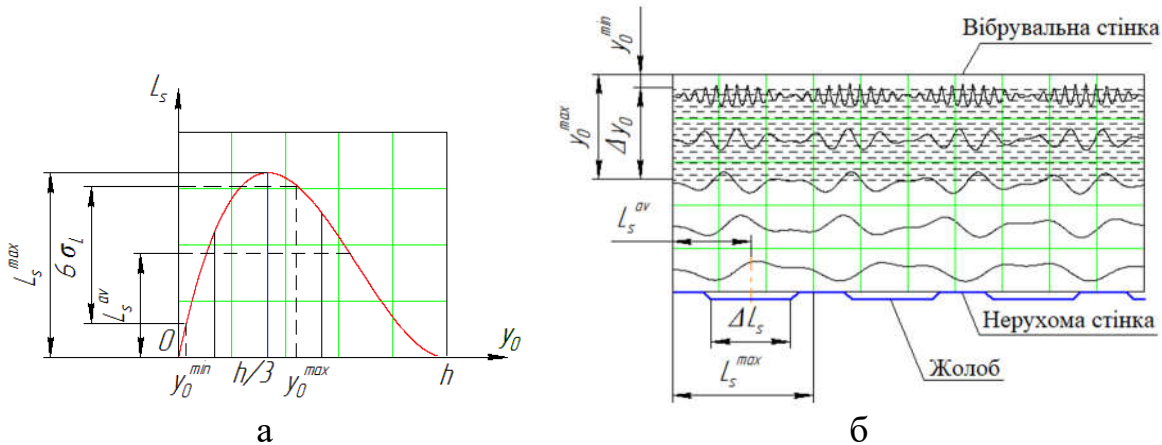


Рисунок 6 – Довжина траєкторії частинки до її захоплення (а) та ефективна зона вібраційного впливу (б)

Установлено, що крок розміщення жолобів дорівнює максимальному значенню оцінюваної довжини вловлювання краплинної рідини.

Одержано вирази для довжини траєкторії частинки, максимальної ширини жолобів і діапазону зміни ефективної зони вібраційного впливу (рис. 6 б):

$$L_s^{max} = \frac{8 \beta q_0}{9 g}, \quad \Delta L_s = 0,675 L_s^{max}, \quad y_v = (0,04 - 0,46) L_s^{max}. \quad (5)$$

У результаті встановлено, що сумарна ширина зливних жолобів у сепараційному каналі становить 67 % від довжини траєкторії вловлювання частинок дисперсної фази, а час перебування краплинної рідини в каналі сепараційного пристрою може бути зменшений до 42 % за рахунок впливу накладених вібрацій.

Досліджено рух краплинної рідини в турбулізованому потоці. У результаті одержано осереднені значення компонент швидкості дисперсних частинок:

$$\begin{aligned}\bar{u}_p &= u_0 + A_2 \sin(\omega_0 t - \varphi) - \sum_{i=3}^4 A_i \sin[(\omega_0 - \lambda u_0)t - \varphi_i], \\ \bar{v}_p &= \sum_{i=3}^4 (-1)^{i+1} B_i \cos[(\omega_0 - \lambda u_0)t - \varphi_i] - gt.\end{aligned}\quad (6)$$

Одержано вирази для ступенів захоплення та обтікання частинок (рис. 7), що відповідають формулам Брандта – Фройнда – Хідемана, попередньо одержаними на основі дослідження вібро-акустичного впливу на турбулентний потік:

$$\eta_p = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi \rho_p d_p^2 f}{9\mu}\right)^2}}, \quad \eta_g = \frac{\pi \rho_p d_p^2 f}{9\mu} \eta_p. \quad (7)$$

Виявлено характеристики турбулентної міграції дисперсної фази у напрямку від вібраційної стінки до нерухомої.

За компонентами $\Delta X_T = \eta_p U'/(4\pi f)$, $\Delta Y_T = \eta_p V'/(4\pi f)$ пульсаційного кроку можна оцінювати пульсаційні характеристики потоку U' , V' , f .

Із застосуванням як регресійного аналізу, так і нескінченних степеневих рядів одержано аналітичні вирази для питомої сили Бассе, що діє на частинки дисперсної фази в потоці з накладеним вібраційним впливом, та безрозмірного критерію, що визначає ступінь впливу цієї сили:

$$f_B = C_B i_s(\omega, t), \quad Bt = d_p \sqrt{\frac{2u_0}{\nu L}}, \quad (8)$$

які містять коефіцієнт сили Бассе (рис. 8) та допоміжну функцію, що визначаються за такими виразами:

$$\begin{aligned}C_B &= \frac{\sum_{i=1}^N A_i \omega_i^{-\frac{1}{2}}}{\sum_{i=1}^N \omega_i^{-1}} = 1,82, \\ i_s &= \frac{1}{\sqrt{\omega}} (i_2 \sin \phi - i_1 \cos \phi) = \frac{1}{\sqrt{\omega}} \sin(\omega t - \psi), \\ i_1 &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)!} \frac{\phi^{2n-\frac{1}{2}}}{2n-\frac{1}{2}}, \quad i_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-2)!} \frac{\phi^{2n-\frac{3}{2}}}{2n-\frac{3}{2}}.\end{aligned}\quad (9)$$

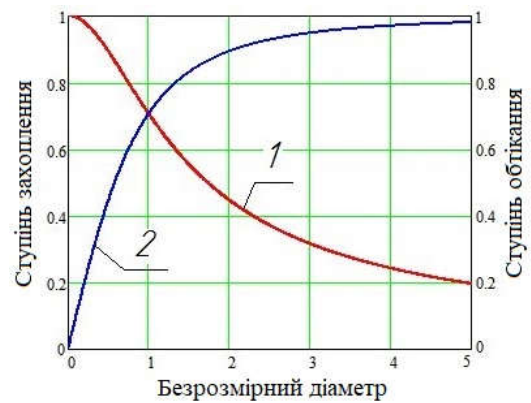


Рисунок 7 – Загальні безрозмірні характеристики швидкості захоплення (1) та ступеня обтікання (2) дисперсних частинок

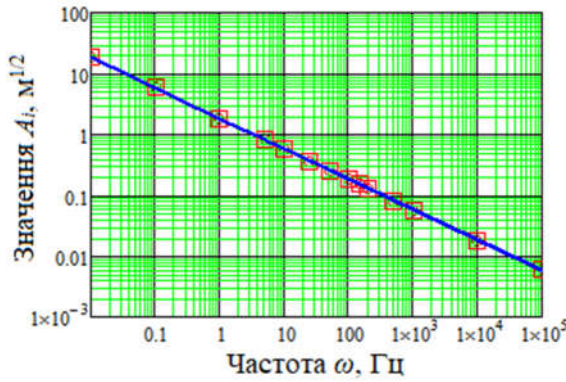


Рисунок 8 – Визначення параметрів сили Бассе

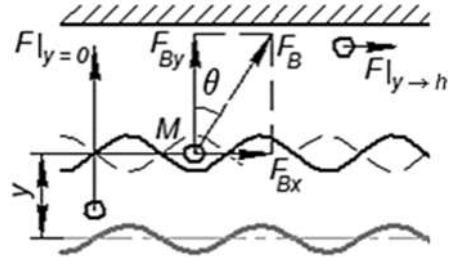


Рисунок 9 – Напрямок дії сили Бассе

Сила Бассе спрямована в бік ввігнутості траєкторії частинок, а її значення зменшується в разі віддалення краплинної рідини від вібрувальної стінки (рис. 9). Крім того, залежність критерію Bt від розміру частинок d_p і довжини хвилі L вібраційного впливу створює науково-теоретичні передумови застосування явища вибіркової сепарації багатокомпонентних гетерогенних систем.

У результаті розгляду моделі віброзважування краплинної рідини в гетерогенній системі зі збудником коливань установлено, що конвективні сили інерції, які діють на краплинну рідину газодисперсного потоку, призводять до зміщення зон локального мінімуму тиску від ядра потоку в бік вібрувальної стінки. Водночас уточнено значення вібраційної сили (рис. 10):

$$F_v = \frac{\pi \rho A^2 \omega^2 z_0^2}{8} f(\eta);$$

$$f(\eta) = \frac{\eta^4}{2} - i_0(\eta); \quad (10)$$

$$i_0(\eta) = \int_0^\eta \frac{x^3}{(1 - \sqrt{\eta^2 - x^2})^2} dx.$$

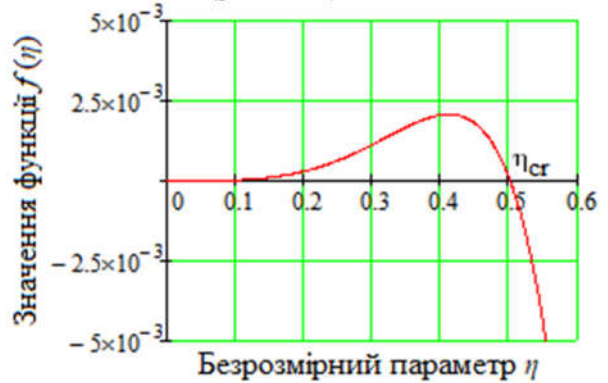


Рисунок 10 – Функція для визначення вібраційної сили

У першому наближенні $i_0(\eta) \approx \eta^4/4$ ця формула відповідає виразам, попередньо одержаним Л. В. Кінгом для сили віброакустичного впливу та Л. І. Блехманом для вібраційної сили.

Одержаний результат дозволяє робити висновок про можливість використання ефекту вібраційного зважування краплинної рідини, а також застосовувати вібраційну силу для інтенсифікації процесу сепарації газокраплинного потоку (рис. 11).

Шляхом застосування основного рівняння динаміки під дією системи сил (рис. 12)

$$\frac{4}{3} \pi \rho_p R^3 \frac{dv_p}{dt} = \frac{4}{3} \pi \rho_p g R^3 - \frac{4}{3} \pi \rho_m g R^3 + \frac{\pi \rho_m A^2 \omega^2 R^4}{32 y^2}, \quad (11)$$

визначено аналітичні вирази для діаметра частинок дисперсної фази та їх розподілу за висотою розміщення віброзв'язаного шару:

$$d_p = \sqrt[3]{\frac{3\sigma}{\pi^2 \rho_p f^2}}; z_0 = \frac{1}{8} \pi f A \sqrt{\frac{3d_p}{\left(\frac{\rho_p}{\rho_m} - 1\right)g}} \quad (12)$$

та встановлено закон руху краплі й визначено час уловлювання частинок дисперсної фази в каналі сепараційного пристрою:

$$y(t) = y_0 + (\chi + \eta_{v0}) \frac{gt^2}{2}, \quad t_w = \sqrt{\frac{2h}{g(\chi + \eta_{v0})}}, \quad \eta_{v0} = \frac{3}{256} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{A}{d_p} \frac{A\omega^2}{g} \left(\frac{d_p}{y_0}\right)^2. \quad (13)$$

Водночас ефективність вібраційного впливу оцінюється за таким параметром:

$$\eta_t = \frac{t_g}{t_w} - 1 = \sqrt{\frac{2h}{gt_w}}. \quad (14)$$

Розглянуто можливість застосування аеропружних ефектів, зокрема флатера, для віброкоагуляції краплинної рідини в сепараційному каналі з пружними відбійними елементами (рис. 12).

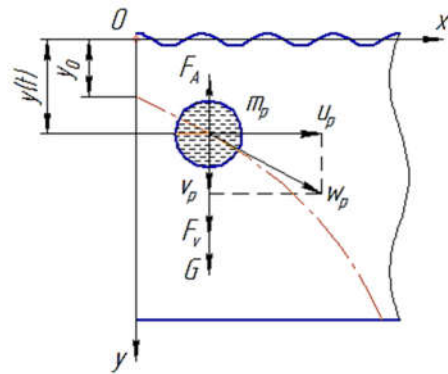


Рисунок 11 – Розрахункова схема руху краплинної рідини

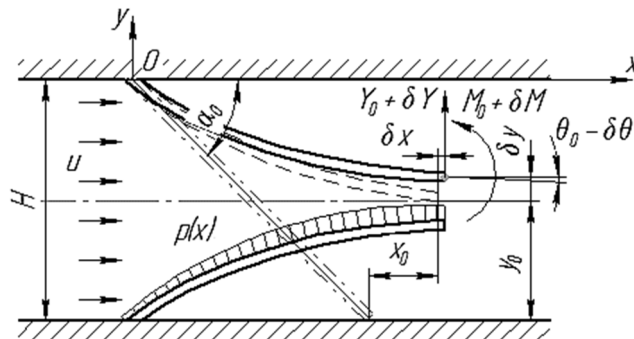


Рисунок 12 – Розрахункова схема задачі гідроаеропружності

На підставі матричних співвідношень у варіаціях, що описують гідроаеропружну взаємодію динамічних сепараційних елементів із газокраплинним потоком,

$$\begin{aligned} [M]\{\delta\ddot{U}\} + [B]\{\delta\dot{U}\} + [C]\{\delta U\} &= \{\delta F\}, \\ \{\delta F\} &= -[\Delta M]\{\delta\ddot{U}\} - [\Delta B]\{\delta\dot{U}\} + [\Delta C]\{\delta U\} \end{aligned} \quad (15)$$

досліджено динамічну стійкість системи «газорідинний потік – відбійний елемент» і встановлено вираз для критичної швидкості флатера:

$$u_{cr} = \sqrt{\frac{a_0 k^4 \omega_*^4 - a_{11} \omega_*^2 + a_{21}}{a_{22} - a_{12} \omega_*^2}}. \quad (16)$$

Досліджено нестационарний капілярний рух рідини у фільтрувальних елементах сепараційних пристроїв (рис. 13). Зокрема, створено уточнену математичну модель нестационарного процесу капілярного підйому рідини:

$$h \frac{d^2 h}{dt^2} + \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 \left[1 + \frac{1}{2} \zeta \operatorname{sign} \left(\frac{dh}{dt} \right) \right] = \frac{4\sigma}{\rho D} \cos \theta - \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho} \right) gh. \quad (17)$$

Запропоновано спрощену модель, параметри якої визначаються із застосуванням методів оцінювання параметрів, зокрема методу найменших квадратів. У результаті одержано відповідні регресійні залежності:

$$h(t) \approx h_{\infty} (1 - e^{-kt}), \quad (18)$$

$$k = - \frac{\sum_{i=1}^n t_i \ln \left(1 - \frac{h_i}{h_{\infty}} \right)}{\sum_{i=1}^n t_i^2}, \quad h_{\infty} = \frac{2\sigma \cos \theta}{(\rho - \rho_a) g \delta}. \quad (19)$$

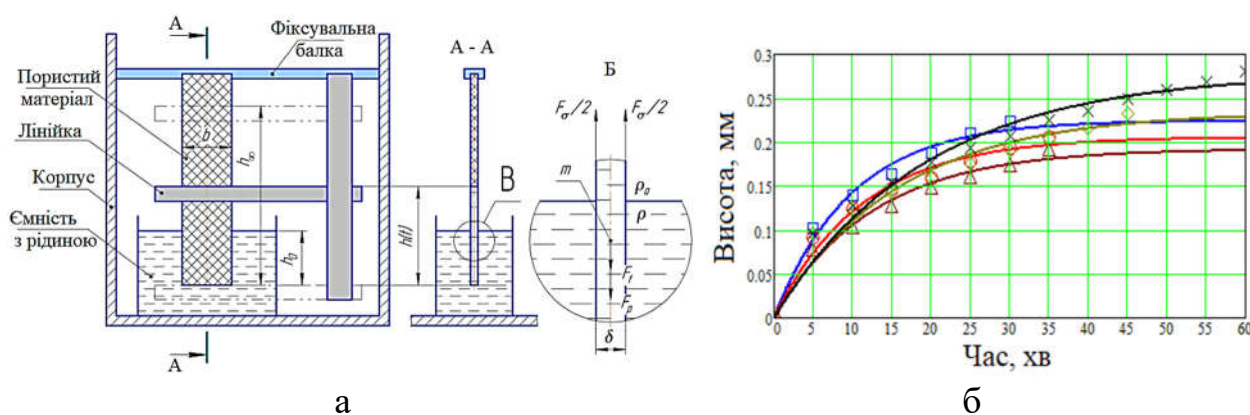


Рисунок 13 – Схема експериментального стенда (а) та одержані часові характеристики (б)

Достовірність запропонованої моделі підтверджується значеннями кореляційного коефіцієнта Пірсона в діапазоні 0,92–0,95, а також їх відповідністю до формули Жюрена – Бореллі для стаціонарного випадку.

Також розроблено наукову основу інтенсифікації процесу капілярного підйому вловленої рідини за рахунок накладання вібраційного впливу. Зокрема, виявлено ефект збільшення висоти капілярного підйому в результаті накладання зовнішнього вібраційного впливу, створюваного ультразвуковим диспергатором УЗДН-А. У результаті аналізу вищенаведеної математичної моделі із застосуванням методу гармонічної лінеаризації одержано лінеаризоване диференціальне рівняння у варіаціях

$$\frac{d^2 \delta \bar{h}}{dt^2} + 2n \frac{d\delta \bar{h}}{dt} + \Omega^2 \delta \bar{h} = \delta f_0 \sin \omega t \quad (20)$$

і встановлено критичну частоту вібраційного впливу

$$\Omega = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho} \right) g \sqrt{\frac{\rho D}{\sigma \cos \theta}}. \quad (21)$$

Створено теорію ґратчастих структур, що дозволяє досліджувати процеси відведення краплинної рідини з фільтрувальних елементів і має важливе практичне застосування в процесі проектування та розрахунку фільтрів і багатофазних сепараторів (рис. 14).

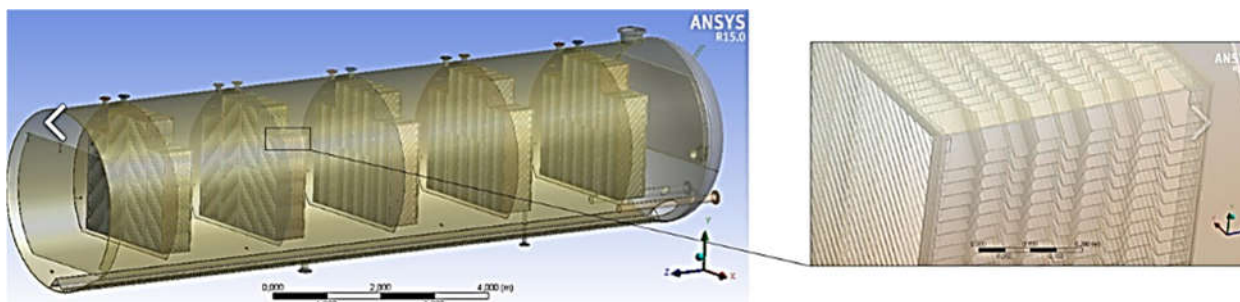


Рисунок 14 – Сфери застосування ґратчастих структур

Теорія ґрунтується на дискретній та квазіконтинуальній імовірнісних моделях зміни кількості речовини під час її проходження через матеріал із ґратчастою, комірковою або пористою структурами заданої мікрогеометрії (рис. 15):

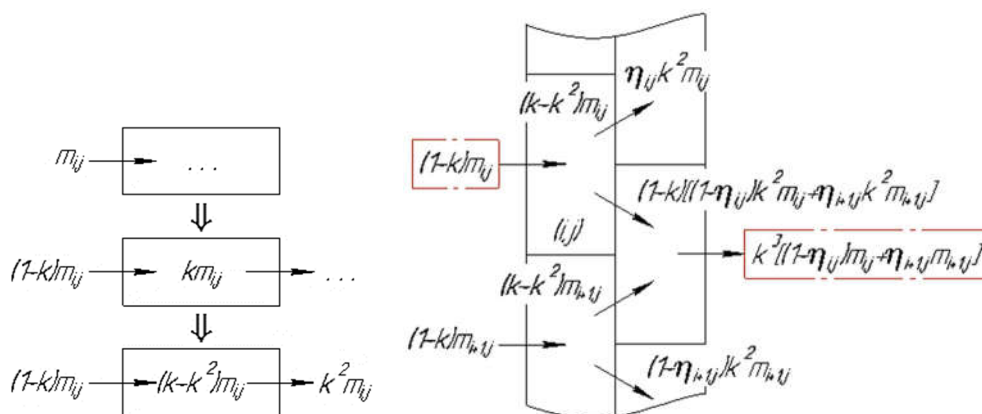


Рисунок 15 – Загальна розрахункова схема ґратчастої структури

Із застосуванням закону збереження маси речовини, що послідовно розгалужується в комірках,

$$m_{i,j} = m_{i,j-1} + m_{i,j}^{<c>} + m_{i,j+1} \quad (22)$$

встановлено закон розподілу:

$$c = \Lambda c_0, \quad c(\xi) = \Lambda(\xi) c_0, \\ \Lambda_j = \left(\frac{k^3}{1-k}\right)^N \prod_{j=1}^N (1 + \varepsilon_j), \quad \Lambda(\xi) = \exp \left[\left(\frac{k^3}{1-k} - 1\right) \xi + \frac{k^3}{1-k} \sum_{j=1}^N \varepsilon_j \right] \quad (23)$$

залежно від безрозмірних характеристик процесу розгалуження речовини в комірках фільтрувального шару:

$$k = \frac{m_{i,j}^{<c>}}{m_{i,j-1}}, \quad \varepsilon_j = \frac{\sum_{i=1}^n (\eta_{i+1,j} - \eta_{i,j}) m_{i,j}}{\sum_{i=1}^n m_{i,j}};$$

$$k^3 = \alpha(1 - k), \quad \alpha = \frac{\Lambda_e}{\left[\prod_{j=1}^N (1 + \varepsilon_j)^n \right]^{\frac{1}{n}}}. \quad (24)$$

Запропоновано методику оцінювання параметрів математичної моделі шляхом застосування мінімізації функціонала сумарної квадратичної похибки:

$$\sum_{n=1}^N \left[\left(\frac{k^3}{1-k} \right)^n \prod_{s=1}^n (1 + \varepsilon_s^{<n>}) - \bar{c}_n \right]^2 \rightarrow \min. \quad (25)$$

У таблиці 1 наведено вирази для дискретних і континуальних функцій проникності щодо різних видів комірок.

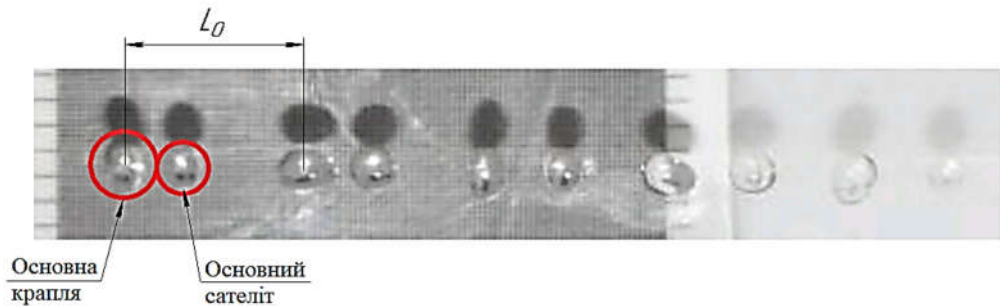
Таблиця 1 – Функції проникності щодо різних видів комірок

Комірка	Коефіцієнт	Функції проникності
	$\lambda_j = \frac{k^3}{1-k} (1 + \varepsilon_j)$	$\Lambda_j = \left(\frac{k^3}{1-k} \right)^j \prod_{s=1}^j (1 + \varepsilon_s)$ $\Lambda(\xi) = \exp \left[\left(\frac{k^3}{1-k} - 1 \right) \xi + \frac{k^3}{1-k} \sum_{j=1}^{\xi} \varepsilon_j \right]$
	$\lambda_j = \frac{k^2 \left[\frac{1}{2} + k \left(\frac{5}{4} + \varepsilon_j \right) \right]}{2(1-k)}$	$\Lambda_j = \left[\frac{k^2}{2(1-k)} \right]^j \prod_{s=1}^j \left[\frac{1}{2} + k \left(\frac{5}{4} + \varepsilon_s \right) \right]$ $\Lambda(\xi) = \exp \left\{ \left[\frac{k^2 \left(1 + \frac{5}{2}k \right)}{4(1-k)} - 1 \right] \xi + \frac{k^3}{2(1-k)} \sum_{j=1}^{\xi} \varepsilon_j \right\}$
	$\lambda_j = \frac{k}{2} \left(1 + \frac{k^2}{1-k} \right) + \frac{k^2}{2} \varepsilon_j$	$\Lambda_j = \left(\frac{k}{2} \right)^j \prod_{s=1}^j \left(1 + \frac{k^2}{1-k} + k \varepsilon_s \right)$ $\Lambda(\xi) = \exp \left\{ \left[\frac{k}{2} \left(1 + \frac{k^2}{1-k} \right) - 1 \right] \xi + \frac{k^2}{2} \sum_{j=1}^{\xi} \varepsilon_j \right\}$

Таким чином, створено науково-теоретичні основи вібраційно-фільтрувальної сепарації газокраплинних потоків, віброгрануляції плавів, нестационарного капілярного підйому рідини при вібраційно-фільтрувальній сепарації, що мають важливе практичне значення для інтенсифікації процесів хімічної технології, зокрема в сепараційному та грануляційному обладнанні.

У четвертому розділі «Розвиток науково-теоретичних основ вібраційних процесів грануляції плавів» проведено науково-теоретичні та експериментальні дослідження гідромеханічних процесів віброгрануляції. Вплив накладених вібрацій на режими коливань краплі досліджували для діапазону частот 220–800 Гц та амплітуд 45–100 мкм. У результаті експериментальних досліджень встановлено, що, починаючи з частоти 240 Гц, відбувається руйнування струменя рідини на основні краплі 1,0 мм з утворенням сателітів діаметром 0,9 мм (рис. 16 а). У цьому разі відстань між групами крапель становила 3,8 мм.

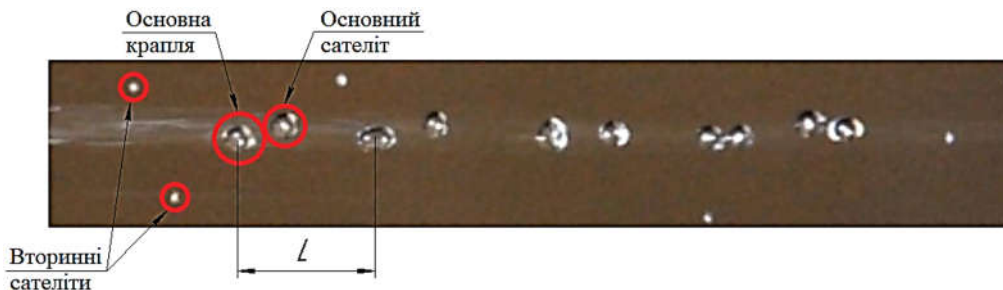
Після руйнування поверхневої взаємодії між краплею і сателітом утворюються вторинні сателіти діаметром 0,2 мм, діаметри основної краплі та основного сателіта зменшуються до 0,9 мм і 0,8 мм відповідно, а відстань між ними зменшується до 2,1 мм. У частотному діапазоні 500–520 Гц встановлюється монодисперсний режим розпаду струменя (рис. 16 б). У цьому разі краплі мають еліпсоїдну форму, більша й менша осі якої почергово змінюються.



а



б



в

Рисунок 16 – Руйнування струменя на краплі на частоті 240 Гц (а), режими коливань краплі в частотному діапазоні 500–520 Гц (б) та утворення вторинних сателітів на частоті 800 Гц (в)

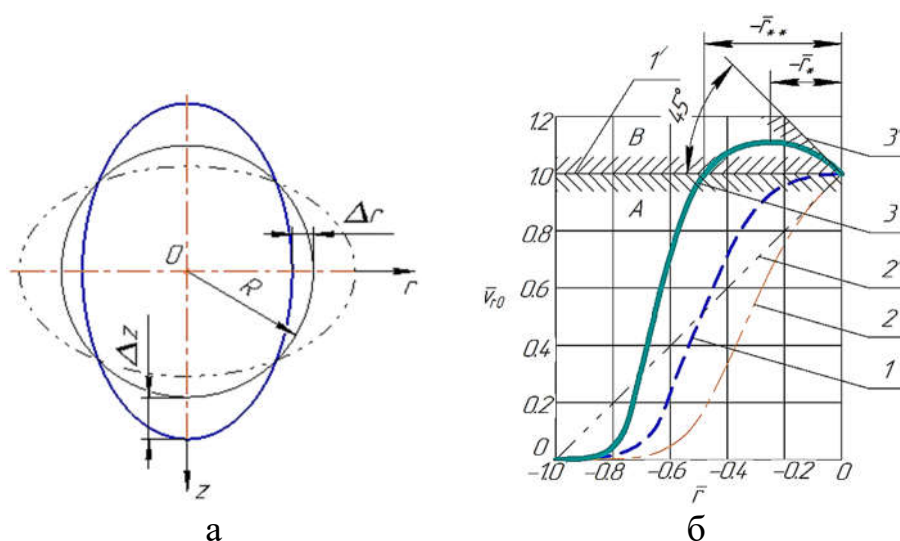
Із подальшим зростанням частоти відбувається полідисперсний розпад струменя. Збільшення частоти вібрацій до 800 Гц призводить до розпилення струменя рідини з утворенням великої кількості вторинних сателітів (рис. 16 в).

У результаті аналітичних розрахунків відповідно до розрахункової схеми (рис. 17 а) та застосування математичної моделі

$$\frac{dv_{r0}(r)}{dr} + \left[\frac{1}{R+r} - \frac{2R^3}{(R+r)^3} \lambda \right] v_{r0}(r) = 0, \quad (26)$$

що відповідає рівнянню нерозривності, одержано вирази для безрозмірних радіальної та осьової компонент швидкості:

$$\bar{v}_r(\bar{r}) = \frac{1}{1+\bar{r}} e^{\frac{\bar{r}(2+\bar{r})}{(1+\bar{r})^2} \lambda R} \sin \lambda z, \quad \bar{v}_z(\bar{r}) = -\frac{2}{(1+\bar{r})^4} e^{\frac{\bar{r}(2+\bar{r})}{(1+\bar{r})^2} \lambda R} \sin \lambda z. \quad (27)$$



A, B – зони незмінного та змінного знака градієнта радіальної швидкості;
 $1-3$ – криві зміни амплітуди радіальної швидкості; $1'-3'$ – дотичні до кривої
 зміни радіальної швидкості на поверхні краплі
 Рисунок 17 – Розрахункова схема (а) та зміна амплітуди радіальної швидкості
 по радіусу краплі (б)

Ці результати підтверджують попередні дослідження, в яких виявлено, що радіальна швидкість у критичному перерізі збільшується від центра струменя до периферії. Це спричиняє руйнування струменя та подальше утворення крапель. Проте запропонований підхід дозволяє встановити критерій, за якого відбувається збереження монодисперсності отримуваних гранул.

Одержано безрозмірну амплітуду радіальної швидкості (рис. 17 б):

$$\bar{v}_{r0}(\bar{r}) = \frac{1}{1+\bar{r}} e^{\frac{\bar{r}(2+\bar{r})}{(1+\bar{r})^2} \lambda R} \approx 1 + (2\lambda R - 1)\bar{r}. \quad (28)$$

Таким чином, підтверджено попередньо одержаний розподіл радіальної швидкості по радіусу краплі.

Установлено, що залежно від частотних характеристик вібраційного впливу існує декілька режимів коливань краплі. У першому режимі, що відповідає зоні A , амплітуда радіальної швидкості зростає від нульового значення в центрі краплі до свого максимального значення на поверхні. Цей режим реалізується до тієї границі, коли довжина хвиль дорівнюватиме граничному значенню $4\pi R$.

У другому режимі, що відповідає зоні B , амплітуда радіальної швидкості на відстані $\bar{r}_{**} = 1 - \frac{1}{n^{2/3}}$ від поверхні краплі перевищує граничне значення і досягає свого максимального значення на відстані $\bar{r}_* = 1 - \frac{1}{\sqrt{n}}$ від поверхні, де $n = L/L_{cr} = 1/(\lambda R)$ – відношення довжини хвилі до її граничного значення $L_{cr} = 4\pi R$. На відстані, ближчій за \bar{r}_* від поверхні краплі, градієнт радіальної швидкості змінює свій знак.

Для двомасової гідромеханічної системи (рис. 18) створено математичну модель процесу віброгрануляції, що описує процес передавання енергії від актуатора до корзини віброгранулятора з урахуванням рідинного шару:

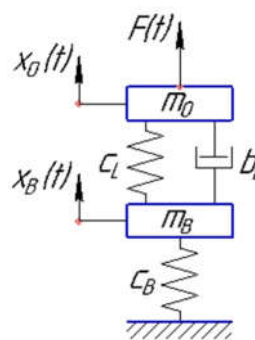


Рисунок 18 – Розрахункова схема двомасової системи

$$[D] \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (29)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} \alpha\mu_B\omega_L^2 - \omega^2 + 2\alpha\mu_B n_L i\omega & -\alpha\mu_B\omega_L^2 - 2\alpha\mu_B n_L i\omega \\ -\mu_B\omega_L^2 - 2\mu_B n_L i\omega & \omega_B^2 + \mu_B\omega_L^2 - \omega^2 + 2\mu_B n_L i\omega \end{bmatrix}. \quad (30)$$

У результаті одержано залежність між парціальною та критичною частотами гідромеханічної системи (рис. 19), а також побудовано амплітудні частотні характеристики гідромеханічної системи (рис. 20):

$$\bar{A}_0(\bar{\omega}) = \frac{(\bar{\omega}^2 - \bar{\omega}_L^2 - 1)\bar{\omega}^2}{\bar{\omega}^4 - [1 + (1 + \alpha)\bar{\omega}_L^2]\bar{\omega}^2 + \alpha\bar{\omega}_L^2}, \quad (31)$$

$$\bar{A}_B(\bar{\omega}) = \frac{\bar{\omega}_L^2\bar{\omega}^2}{\bar{\omega}^4 - [1 + (1 + \alpha)\bar{\omega}_L^2]\bar{\omega}^2 + \alpha\bar{\omega}_L^2},$$

та запропоновано вирази для оцінювання жорсткісних і демпфувальних характеристик:

$$c_L = m_B(\omega_0^2 - \omega_B^2), \quad \bar{n}_L = 0,5 \frac{\bar{\omega}_L^2/\bar{\omega}_0}{\sqrt{(\bar{A}_B^{res})^2 - 1}}. \quad (32)$$

Досліджено вплив динамічних характеристик привода на надійність грануляційного обладнання. У результаті показано, що сила зчеплення зубців має періодичний характер (рис. 21).

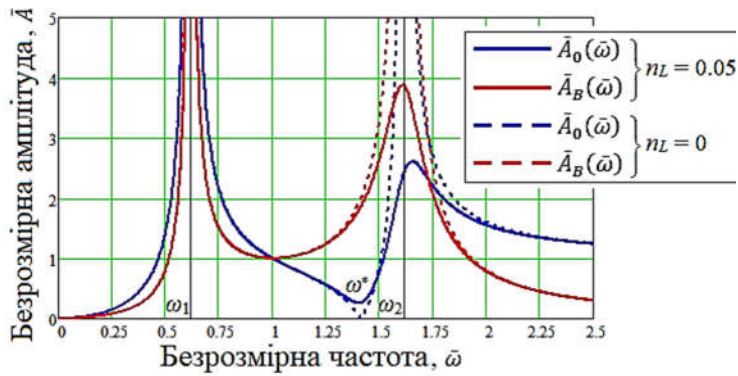


Рисунок 19 – Амплітудні частотні характеристики системи

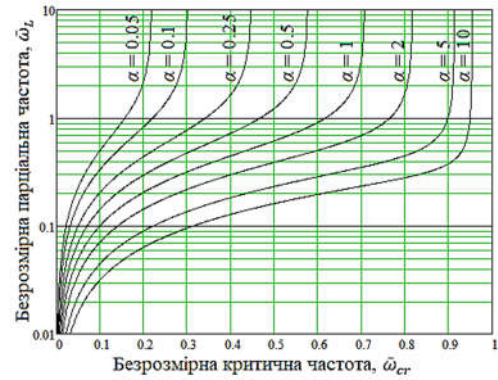


Рисунок 20 – Залежність між частотами системи

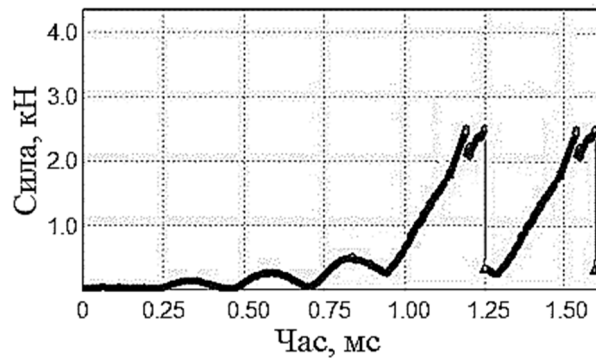


Рисунок 21 – Зміна з часом сили контактної взаємодії

Одержаний результат свідчить про необхідність застосування більш гнучких, клинопасових передач, які на цей час надійно зарекомендували себе на ринку грануляційного обладнання та успішно впроваджені в практику розроблення нових конструктивних рішень під час проектування віброгрануляторів у Сумському державному університеті.

Викладено теоретичні основи моделювання динамічного стану ротора обертового віброгранулятора з огляду на дослідження його вільних та вимушених коливань у підшипникових опорах, характеристики яких визначають вібраційну надійність роторної системи:

$$\det([C(\omega_*)] - \omega_*^2[M]) = 0, \{A(\omega)\} = \omega^2([C(\omega)] - \omega^2[M])^{-1}\{D\}. \quad (33)$$

Запропоновано регресійні залежності для оцінювання коефіцієнтів жорсткісних характеристик опор:

$$c = c_0 + \alpha\omega^2, \quad \alpha = \frac{\sum_{k=1}^n (c_k - c_0)\omega_k^2}{\sum_{k=1}^n \omega_k^4}. \quad (34)$$

У результаті викладені теоретичні основи моделювання динамічного стану ротора обертового віброгранулятора дозволяють забезпечувати вібраційну надійність гідромеханічної системи шляхом дослідження характеристик вільних і вимушених коливань.

У п'ятому розділі «Наукові основи супутніх процесів при сепарації гетерогенних систем» досліджено процеси, що супроводжують основні гідромеханічні або тепломасообмінні процеси, зокрема вторинні процеси сепарації багатокомпонентних гетерогенних систем. Зокрема, досліджено процес стікання плівкової рідини у тривимірній постановці (рис. 22 а):

$$u = \frac{g}{\nu} y \left(\delta - \frac{y}{2} \right) + cy(y^2 - 3\delta^2);$$

$$w = \left[\frac{\tau}{\mu} + \frac{kg}{\nu} \left(\delta - \frac{y}{2} \right) \right] y; \quad (35)$$

$$Q_{u0} + Q_{w0} = Q_{u1} + Q_{w1}.$$

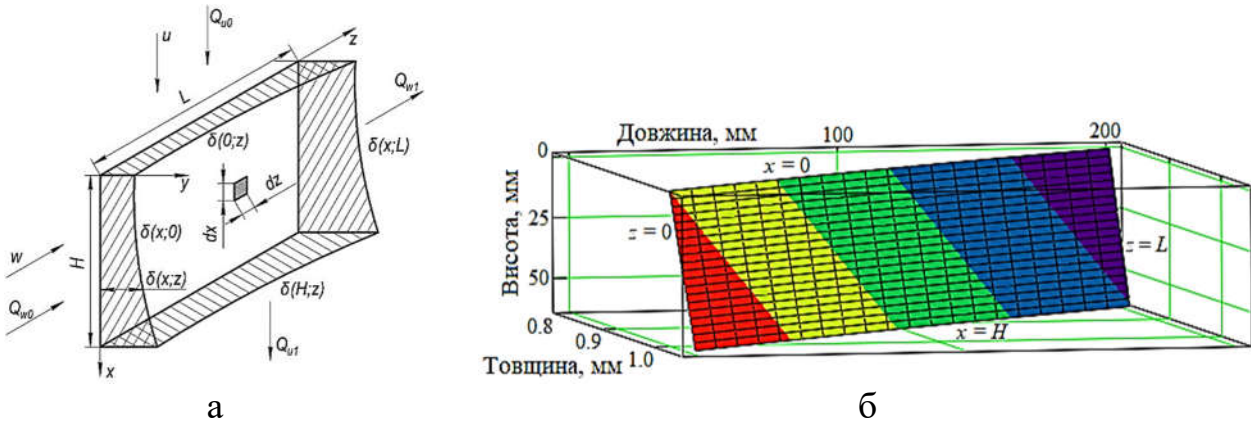


Рисунок 22 – Розрахункова схема процесу стікання плівки рідини (а) та функція розподілу товщини (б)

З урахуванням фізичних і кінематичних граничних умов одержано аналітичний вираз для функції розподілу товщини плівки вловленої рідини по стінці функціонального елемента сепараційного каналу (рис. 22 б):

$$\delta = \delta_0 (4,35 Cr_s)^{\frac{z-kx}{2L}}, \quad (36)$$

та компоненти швидкостей стікання плівки на поверхні розділення фаз (рис. 23):

$$u_s(x, z) = u(x, \delta(x, z), z), \quad w_s(x, z) = w(x, \delta(x, z), z). \quad (37)$$

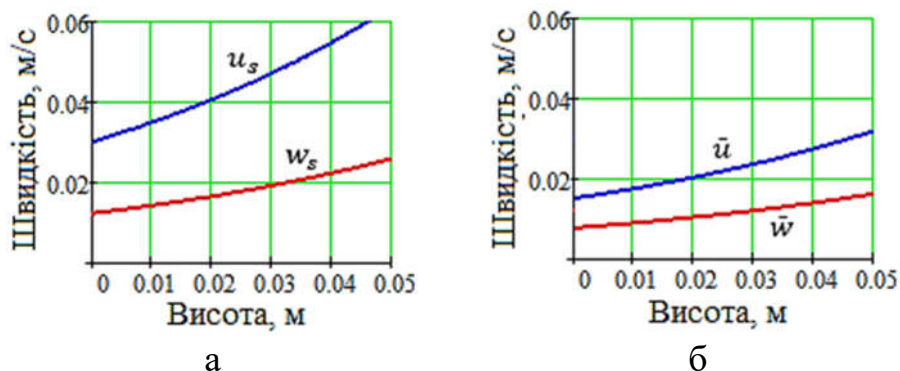


Рисунок 23 – Компоненти швидкості на поверхні розділення фаз (а) та середньої швидкості (б)

Установлено критичне значення 0,23 безрозмірного критерію $Cr_s = \tau/(\rho g L)$, що визначає форму поверхні розділення фаз.

Для заданої геометрії каналу і швидкості потоку 4,4 м/с установлено, що товщина плівки вловленої рідини становить 0,8–1,0 мм, а швидкість її унесення на поверхні розділення фаз змінюється в діапазоні 0,015–0,025 м/с. Максимальне значення цієї швидкості, що відповідає числу Рейнольдса $Re = 31$, перевищує граничне значення, за якого відбувається хвилеутворення на поверхні плівки ($Re_{cr} = 24$). Для запобігання цьому явищу запропоновано встановлення системи дренажних отворів у зоні найбільшої швидкості, а відповідна методика розрахунку зводиться до визначення ефективної площі, що для даного випадку становить $6,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Шляхом розв'язання крайової задачі у вигляді системи диференціальних рівнянь Нав'є – Стокса та Фур'є – Кірхгофа, зведених до двох незв'язаних крайових задач, одна з яких визначає процес супутнього конвективного теплообміну на охолоджуваній поверхні сепараційного каналу (рис. 24), для заданих граничних умов одержано вираз для розподілу температури:

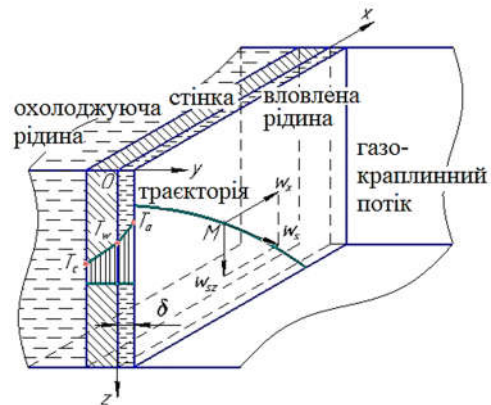


Рисунок 24 – Розрахункова схема моделі конвективного теплообміну

$$T = T_w + \frac{\Delta T_0}{p_1 - p_2} (p_1 e^{p_2 x} - p_2 e^{p_1 x}) \left[\frac{\alpha \delta y}{\lambda_T \delta} \left(1 - \frac{y}{\delta} \right) + \frac{y^2}{\delta^2} \right],$$

$$p_1 = \sqrt{C_1^2 + C_2} - C_1, \quad p_2 = - \left(C_1 + \sqrt{C_1^2 + C_2} \right), \quad (38)$$

$$C_1 = \frac{1}{2\delta} \frac{10 - Nu \cdot Pe}{2 + Nu}, \quad C_2 = \frac{6}{\delta^2} \frac{Nu + Pe - 1}{2 + Nu},$$

залежно від безрозмірних критеріїв Нуссельта, Прандтля та Рейнольдса.

Створено науково-теоретичні основи дослідження поверхні розділення (контакту) фаз у процесах хімічної технології та інженерії. На основі запропонованої математичної моделі, що враховує імовірнісну природу розподілу частинок за їх розмірами

$$S = 4\pi N \sum_{j=1}^P n_j R_j^2 = 4\pi N \int_{R_{min}}^{R_{max}} R^2 p(R) dR$$

$$c = \frac{4\pi}{3V} \sum_{j=1}^P n_j R_j^3 = \frac{4\pi N}{3V} \int_{R_{min}}^{R_{max}} R^3 p(R) dR \quad (39)$$

одержано загальний аналітичний вираз для площі поверхні контакту фаз залежно від об'єму середовища та концентрації дисперсної фази

$$S = \alpha N^{1/3} (cV)^{2/3}, \quad \alpha = 4,84 \frac{\sum_{j=1}^P n_j R_j^2}{\left(\sum_{j=1}^P n_j R_j^3 \right)^{2/3}} = 4,84 \frac{\int_{R_{min}}^{R_{max}} R^2 p(R) dR}{\left[\int_{R_{min}}^{R_{max}} R^3 p(R) dR \right]^{2/3}} \quad (40)$$

і коефіцієнта α , що залежить від закону розподілу частинок дисперсної фази за їх розмірами.

Зокрема, для рівномірного закону розподілу цей коефіцієнт змінюється в діапазоні 4,06–4,84 залежно від значення коефіцієнта варіації R_{min}/R_{max} (рис. 25 а). Для нормального закону розподілу частинок дисперсної фази цей коефіцієнт змінюється в діапазоні 4,69–4,84 залежно від середньоквадратичного відхилення густини розподілу розмірів частинок (рис. 25 б).

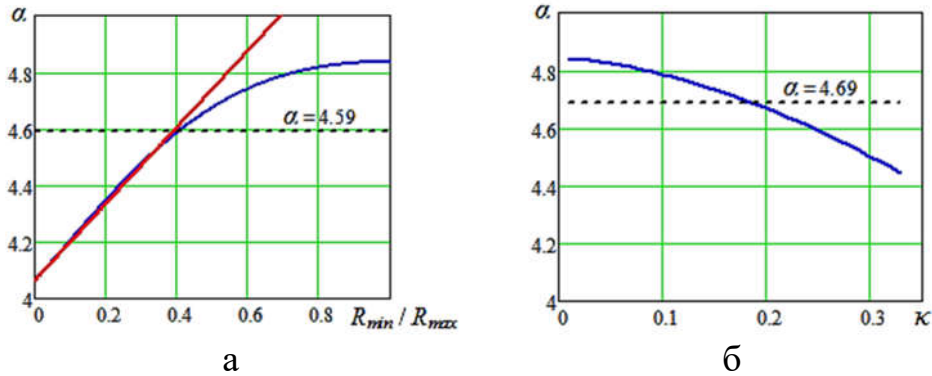


Рисунок 25 – Значення коефіцієнт α для рівномірного (а) і нормального (б) законів розподілу дисперсного складу частинок

Порівняння запропонованого підходу з існуючими підходами до визначення питомої поверхні контакту фаз, що розглядалися у працях В. Г. Айнштейна, Ю. І. Дитнерського та Н. І. Гельперіна, дозволяє одержати уточнений аналітичний вираз для питомої поверхні контакту фаз:

$$\alpha = k \frac{6c}{d_p}, \quad k = \sqrt{\frac{\alpha^3}{36\pi}}, \quad (41)$$

що містить поправковий коефіцієнт k , мінімальне значення якого знаходиться у діапазоні 0,77–0,88 залежно від закону розподілу частинок за розмірами.

Таким чином, теоретично обґрунтовано, що під час моделювання процесів хімічної технології та проектування відповідного обладнання необхідно вводити поправковий коефіцієнт 1,12–1,23, що враховує дисперсний склад частинок.

На підставі розгляду диференціального рівняння руху центра мас (рис. 26):

$$m_1 a_{c1} = G - F_A + F_\sigma \cos \Delta \alpha, \quad (42)$$

досліджено процес вторинного подрібнення, що дозволило визначити граничний діаметр краплі та час подрібнення:

$$d_{cr} = \sqrt[4]{\frac{64\sigma z_0^3}{\rho a^2}}, \quad (43)$$

$$T_s = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{2,44}{\sqrt{We}} + \sqrt{1 + \frac{5,94}{We}} \right).$$

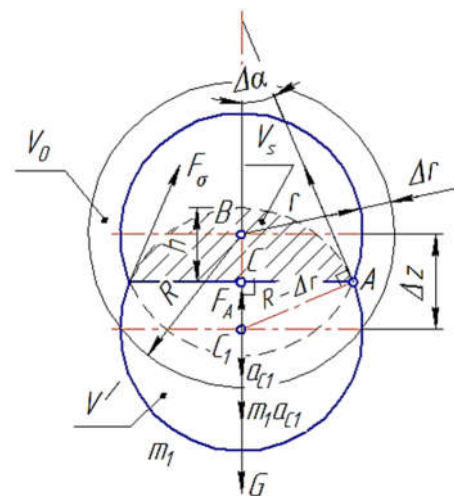


Рисунок 26 – Розрахункова схема вторинного подрібнення

У результаті вперше теоретично обґрунтовано існування критичного значення числа Вебера, експериментально підтвердженого Г. І. Келбалієвим та З. І. Ібрагімовим. Зокрема, для процесу вторинного подрібнення краплі одержано значення $We_{cr} = 5,9$, яке знаходиться у діапазоні $We = 4-40$, попередньо одержаному Д. Г. Пажи та В. С. Галустовим.

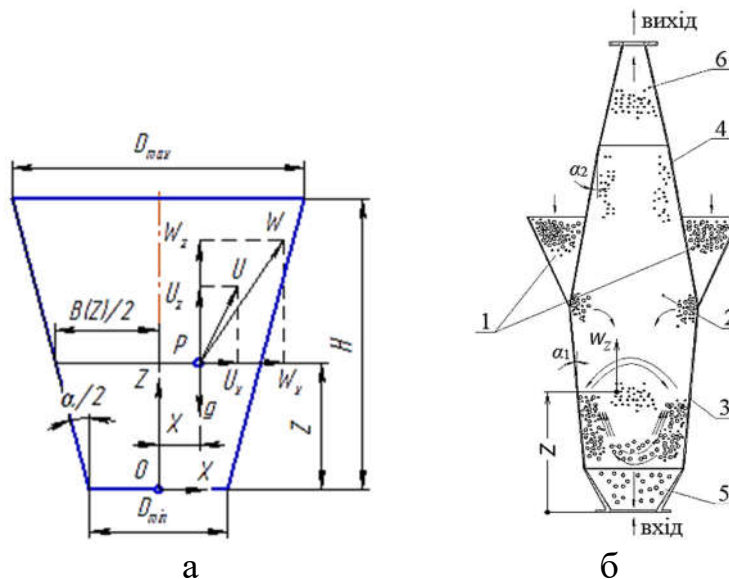
У шостому розділі «Інтеграція науково-теоретичних основ із теоріями нестационарних гідромеханічних і тепломасообмінних процесів хімічної технології» викладено науково-теоретичні та практичні результати, пов'язані з поширенням одержаних закономірностей на методи теоретичних і експериментальних досліджень процесів хімічної технології. Зокрема, проведено математичне моделювання гідродинаміки газодисперсного потоку у вертикальному пневмокласифікаторі (рис. 27 а) та одержано аналітичні вирази для компонентів швидкості газового потоку:

$$w_z(z) = \frac{w_{z0}}{\left(1 + \frac{n\lambda z}{2D}\right)^{\frac{1}{n}}}, \quad w_x = w_z \left[\frac{2x}{B} \left(1 - \frac{2x}{B}\right)\right]^{\frac{1}{m}}. \quad (44)$$

Запропоновано методику оцінювання параметрів розробленої моделі:

$$C = \frac{\sum_{k=1}^N \ln \frac{D_0}{D_k} \ln \frac{W_Z^{<k>}}{W_Z^{<0>}}}{\sum_{k=1}^N \ln \frac{D_0}{D_k}}, \quad n = \frac{\sum_{k=1}^N \ln(1 + \bar{\lambda} z_k) \ln\left(\frac{w_0}{w_k}\right)}{\sum_{k=1}^N \ln^2\left(\frac{w_0}{w_k}\right)}; \quad (45)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{k=1}^N \left[\left(\frac{w_0}{w_k}\right)^n - 1\right] z_k}{\sum_{k=1}^N z_k^2}, \quad m = \frac{\sum_{p=1}^P \ln\left[\frac{2X_p}{B_p} \left(1 - \frac{2X_p}{B_p}\right)\right] \ln \frac{W_X^{<p>}}{W_X^{<0>}}}{2 \sum_{p=1}^P \ln \frac{W_X^{<p>}}{W_X^{<0>}}}.$$



1 – завантаження матеріалу; 2 – корпус пневмокласифікатора; 3 – секція сепарації; 4 – секція унесення дрібнодисперсної фракції;
5 – нижня частина; 6 – ділянка прискорення

Рисунок 27 – Розрахункові схеми дослідження гідродинаміки (а) та зміни концентрації дисперсної фази (б)

На підставі розгляду гідродинаміки висхідного руху одиночної частинки дисперсної фази в газодисперсному потоці в каналі зі змінним перерізом одержано компоненти швидкості частинок (рис. 28).

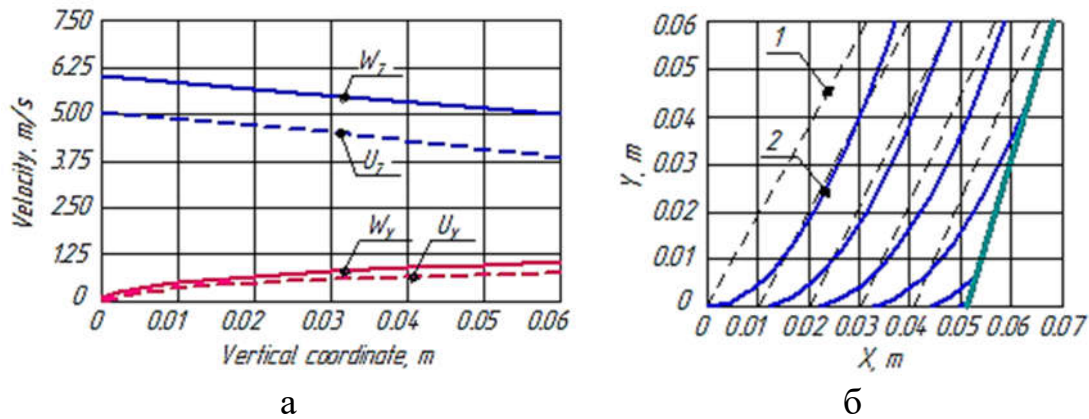


Рисунок 28 – Компоненти швидкостей (а) і траєкторії (б) газового потоку (1) та частинок дисперсної фази (2)

Розглянуто нестационарну задачу про визначення концентрації дисперсної фази в процесі пневмокласифікації механічних сумішей та одержано відповідний аналітичний вираз для зміни з часом розподілу концентрації тонкої фракції по висоті апарата (рис. 29) в безрозмірній формі ($\alpha = c^*/c_0$; $\eta = ky/v$; $\tau = vt/y$):

$$\bar{c}_p(\eta, \tau) = \alpha + (1 - \alpha)\{e^{-\eta}H(\tau - 1) + e^{-\eta\tau}[1 - H(\tau - 1)]\}; \quad (46)$$

$$\bar{c}_{p\infty}(\eta) = \alpha + (1 - \alpha)e^{-\eta}.$$

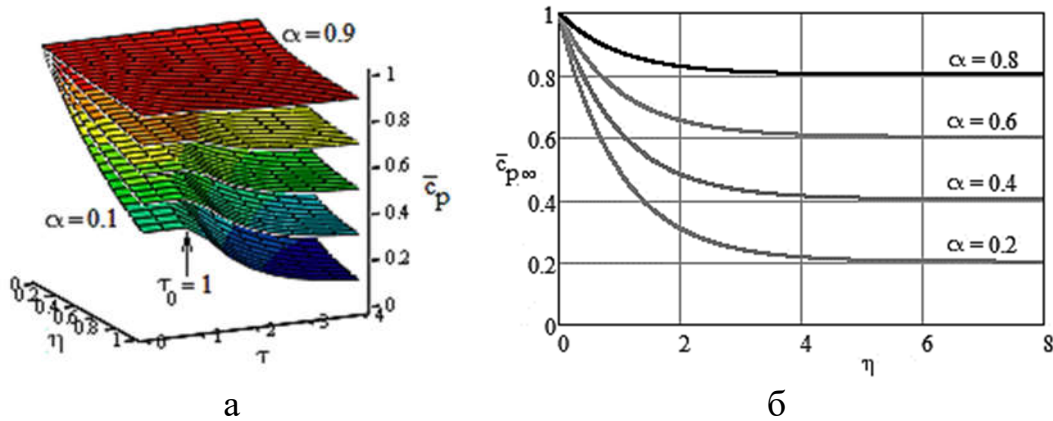


Рисунок 29 – Зміна концентрації тонкої фракції у нестационарній (а) та стаціонарній (б) постановках

На підставі аналізу експериментальних даних запропоновано залежність для визначення періоду завантаження сипкого матеріалу до апарата:

$$T_a = a \left(\frac{d_c}{d_f} \right)^n, \quad (47)$$

емпіричні коефіцієнти якої визначаються за такими регресійними залежностями (рис. 30):

$$\ln a = \frac{\sum_{i=1}^N \psi_i \cdot \sum_{i=1}^N \psi_i \ln T_i - \sum_{i=1}^N \psi_i^2 \cdot \sum_{i=1}^N \ln T_i}{(\sum_{i=1}^N \psi_i)^2 - N \cdot \sum_{i=1}^N \psi_i^2}, \quad (48)$$

$$n = \frac{\sum_{i=1}^N \psi_i \cdot \sum_{i=1}^N \ln T_i - N \cdot \sum_{i=1}^N \psi_i \ln T_i}{(\sum_{i=1}^N \psi_i)^2 - N \cdot \sum_{i=1}^N \psi_i^2}.$$

Вищезазначену математичну модель поширено на оцінювання параметрів процесу вимивання поживних речовин з капсульованих добрив (рис. 23):

$$\Delta c(N) = \Delta c_0 \exp(-\alpha N) + \Delta c_* [1 - \exp(-\alpha N)], \quad (49)$$

де оцінюваний параметр визначається за такою регресійною залежністю (рис. 31):

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \frac{\ln(\Delta c_* - \Delta c_i)}{\Delta c_* - \Delta c_0}}{\sum_{i=1}^n N_i^2}. \quad (50)$$

Установлено аналітичний вираз для визначення часу вимивання поживних речовин із ґрунту:

$$T_r = -\frac{T_p}{\ln(1-p)} \ln \frac{\Delta c_* - \Delta c_0}{\Delta c_* - [\Delta c]}. \quad (51)$$

Граничне значення кількості вивільненого азоту для добрив з органо-мінеральним покриттям становить 35–120 мг/кг.

Таким чином, науково-теоретичні основи процесів хімічної технології, описані в попередніх розділах, поширено на дослідження процесів пневмокласифікації механічних сумішей, а також вимивання поживних речовин із капсульованих мінеральних добрив.

У сьомому розділі «Практична реалізація результатів дисертаційного дослідження» наведено практичну реалізацію основних результатів дисертаційної роботи.

На підставі розгляду способів і пристроїв для розділення дво- і трифазних гетерогенних систем запропоновано нові, енергоефективні пристрої та способи сепарації краплинної рідини з газорідного потоку (рис. 32).

Нові способи та пристрої захищені патентами України (№ 102445, № 111039, № 130464) та дозволяють досягти високого значення ефективності розділення в діапазоні зміни швидкості потоку 2–15 м/с за рахунок динамічного регулювання гідравлічного опору, а також запобігти потраплянню критичних об'ємів рідини до сепараційного обладнання та виходу на пробкові режими роботи.

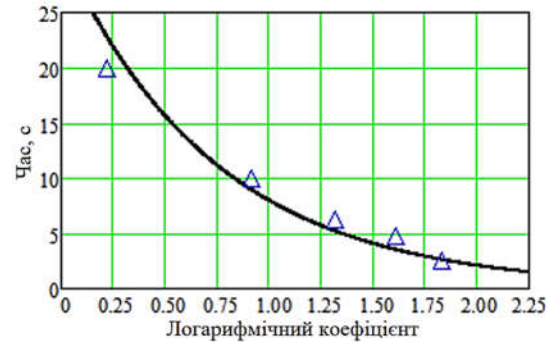


Рисунок 30 – Період завантаження

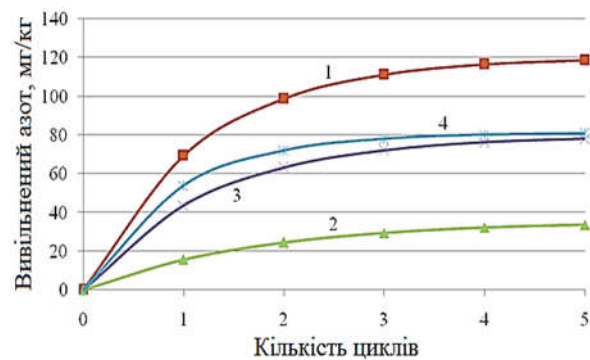


Рисунок 31 – Вимивання поживних речовин

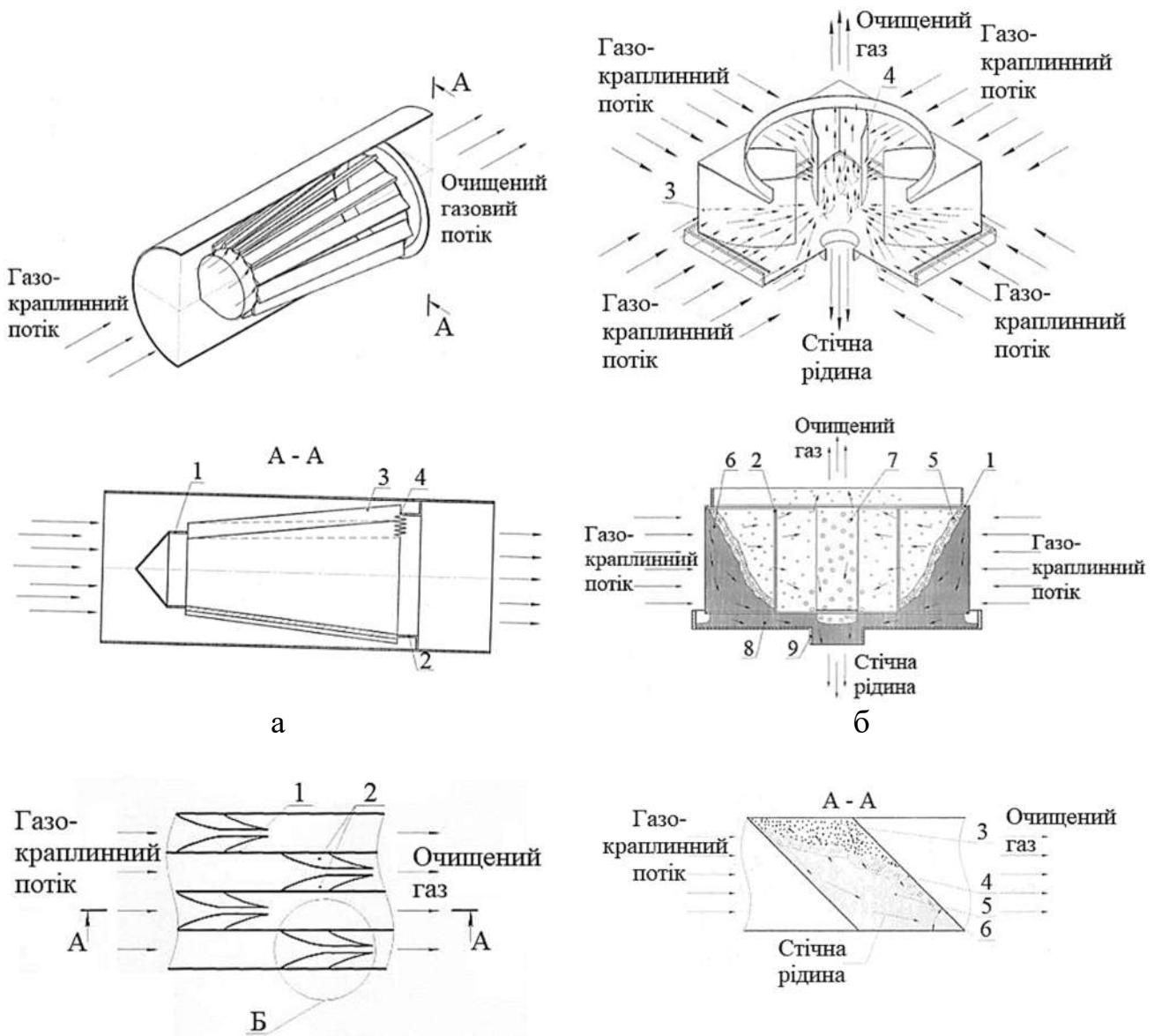


Рисунок 32 – Пристрій для сепарації дисперсної рідини (а) та способи вловлювання високодисперсної краплинної рідини (б, в)

Запропоновано модульний підхід у проектуванні сепараційного обладнання. Зокрема, перевагами такого підходу під час проектування багатфункціональних сепараторів із динамічно регульованими пристроями є зменшення масогабаритних характеристик, поєднання в одному модулі декількох технологічних процесів, що також спрощує процес розроблення і впровадження автоматизованих систем управління, підвищуючи якість підготовки продукту. Для імплементації запропонованого підходу під час конструювання, виготовлення деталей і складання відповідних вузлів розроблено методику класифікації сепараційного обладнання за конструкторсько-технологічними ознаками, а також конструкторсько-технологічну класифікацію уніфікованих модулів сепараційних пристроїв (рис. 33).

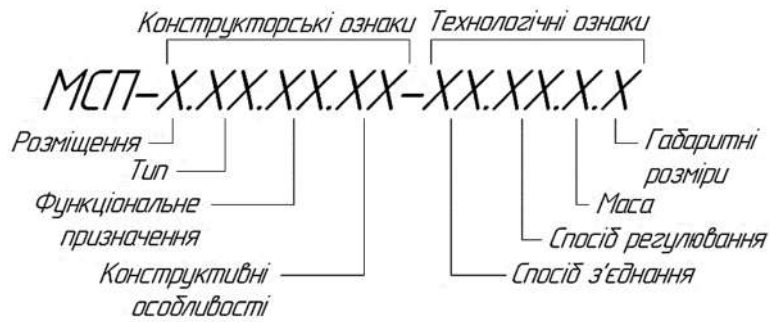


Рисунок 33 – Конструкторсько-технологічна класифікація модульних сепараційних пристроїв

Розроблені математичні моделі стікання вловленої плівки рідини в процесі сепарації газокраплинного потоку та зміни концентрації дисперсної фази поширено на вирішення завдання про визначення необхідної кількості блоків сепараційного пристрою за критерієм ефективності вловлювання плівкової рідини:

$$c_{i+1}^{<j>} = c^* + (c_i^{<j>} - c^*) \exp\left(-\frac{k_c L_i^{<j>}}{w_i^{<j>}}\right). \quad (52)$$

У результаті запропоновано аналітичний вираз для визначення необхідної кількості блоків сепараційного пристрою за критерієм ефективності вловлювання плівкової рідини:

$$N_{min} = \frac{w}{k_c L} \ln \frac{c_0 - c^*}{c_N - c^*}. \quad (53)$$

Розроблено узагальнену методику визначення ефективності гідромеханічних і тепломасообмінних процесів, що ґрунтується на комплексному застосуванні засобів штучного інтелекту (рис. 34) та багатопараметричного квазі-лінійного регресійного моделювання. Водночас за основу моделювання обрано таку залежність:

$$y = \alpha \prod_{k=1}^m x_k^{\beta_k}. \quad (54)$$

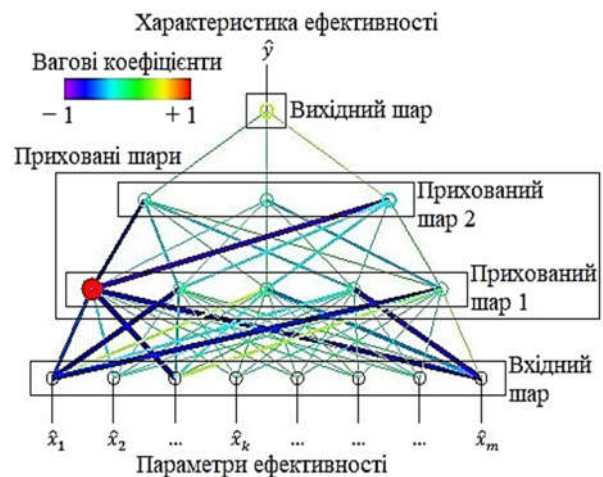


Рисунок 34 – Застосування штучних нейронних мереж

Оцінювані коефіцієнти α , m та невідомі показники степенів β_k визначаються за формулою лінійної регресії:

$$\{X\} = ([C]^T [C])^{-1} [C]^T \{Y\}, \quad (55)$$

елементи матриць і векторів-стовпців якої

$$\{X\} = ([C]^T[C])^{-1}[C]^T\{Y\},$$

$$[C] = \left[\begin{array}{c|c} n & \{S\}^T \\ \hline - & - \\ \{S\} & [D] \end{array} \right], \{X\} = \left\{ \begin{array}{c} \bar{\alpha} \\ \{B\} \end{array} \right\}, \{F\} = \left\{ \begin{array}{c} Y_0 \\ \{Y\} \end{array} \right\}, \quad (56)$$

$$Y_0 = \sum_{i=1}^n \bar{y}^{(i)}, Y_k = \sum_{i=1}^n \bar{y}^{(i)} \bar{x}_k^{(i)}, S_k = \sum_{i=1}^n \bar{x}_k^{(i)}, D_{j,k} = \sum_{i=1}^n \bar{x}_j^{(i)} \bar{x}_k^{(i)},$$

формуються із застосуванням безрозмірних аналогів параметрів x_k та y_k , згенерованих масивом фізичних або ймовірнісним набором віртуальних експериментів із застосуванням штучних нейронних мереж. Водночас встановлено вираз для сумарної відносної похибки оцінювання ефективності:

$$\delta_y = \sqrt{\delta_\alpha^2 + \sum_{k=1}^m (\beta_k \ln x_k)^2 \delta_{\beta k}^2}. \quad (57)$$

Застосування запропонованої методики до сепарації газокраплинного потоку об'єднує існуючі підходи до визначення параметрів ефективності процесу за коефіцієнтом сепарації, фракційною ефективністю та сумарною ефективністю сепарації послідовно розміщених у корпусі апарата модульних сепараційних пристроїв.

Розроблені наукові положення та практичні рекомендації впроваджено у виробничу діяльність ТОВ «Пром-Енерго Продукт» (м. Харків) і навчальний процес Сумського державного університету, зокрема за госпдоговірними науково-дослідними роботами «Гідродинамічні показники двофазних потоків тепломасообмінного, грануляційного та сепараційного обладнання» (ДР № 0115U002551) та «Розробка підігрівача-деемультатора типу «HEATER–TREATER» установки підготовки нафти» (договір № 51.18-04.15.СП) на замовлення ПАТ «Укрхімпроект» (м. Суми).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, що є завершеним науковим дослідженням, розроблено та обґрунтовано наукові положення, висновки і рекомендації, сукупність яких репрезентує нові науково-обґрунтовані результати в галузі хімічної технології та інженерії, які дозволили вирішити важливу науково-прикладну проблему інтенсифікації й удосконалення процесів у сепараційних, класифікаційних і грануляційних пристроях шляхом розроблення науково-теоретичних основ процесу вібраційного впливу на гетерогенні системи, моделювання гідродинаміки модульних сепараційних пристроїв, аналізу впливу процесів сполученого конвективного теплообміну і супутнього нестационарного капілярного руху рідини при фільтрації на ефективність процесів сепарації газоконденсатних систем, а також запобігання негативній дії вторинних процесів (бризковинесення, руйнування плівкової рідини і хвилеутворення та вторинного подрібнення крапель дисперсної фази) та впливу вібрацій на процес утворення гранул монодисперсного складу.

Одержані науково-практичні результати полягають у такому:

1. На підставі аналізу й узагальнення методів дослідження гідродинамічних і теплообмінних процесів встановлено, що вібраційні процеси в гетерогенних системах є недостатньо вивченими з точки зору їх впливу на основні та вторинні процеси в гетерогенних системах, що потребує проведення математичного моделювання процесів вібраційної сепарації газокраплинних систем, віброгрануляції плавів, пневмокласифікації та фільтрації, а також надання рекомендацій щодо проектування відповідного обладнання хімічної технології.

2. За допомогою теоретичного аналізу впливу накладених вібрацій на частинки дисперсної фази в турбулізованому потоці уточнено фізичну й математичну моделі руху частинок дисперсної фази, визначено їх кінематичні характеристики та встановлено безрозмірні параметри, що визначають особливості руху краплинної рідини в сепараційному каналі. У результаті підтверджено можливість застосування процесів віброкоагуляції та вибіркової сепарації краплинної рідини, чим закладено науково-теоретичні основи процесу вібраційної сепарації газодисперсного потоку. Зокрема, на підставі дослідження закономірності процесу перенесення дисперсних частинок із потоку на нерухому стінку сепараційного пристрою одержано аналітичні вирази для кінематичних характеристик краплинної рідини та ефективної зони вібраційного впливу. У результаті встановлено, що сумарна ширина зливних жолобів у сепараційному каналі становить 67 % від довжини траєкторії вловлювання частинок дисперсної фази, а час перебування краплинної рідини в каналі сепараційного пристрою може бути зменшений до 42 % за рахунок впливу накладених вібрацій.

3. Створені наукові основи оцінювання параметрів гідроаеропружної взаємодії газокраплинного потоку дозволили встановити залежність між критичною швидкістю флатера і жорсткістю динамічних відбійних сепараційних елементів. Зокрема, встановлено, що для запропонованої конструкції флатер виникає за швидкості газового потоку 6 м/с, що дає можливість розмежувати область робочих швидкостей на дві зони, одна з яких (2–6 м/с) відповідає за динамічне регулювання гідравлічного опору, інша (більше 6 м/с) – призводить до віброкоагуляції краплинної рідини.

4. Розроблена математична модель вторинного подрібнення краплинної рідини під дією сил інерції, поверхневого натягу, тяжіння, Архімеда і вібраційної сили дозволила встановити аналітичні залежності для визначення граничного розміру нестабільних крапель, а також критичну частоту вібраційного впливу. У результаті інтегрування диференціального рівняння руху, що описує процес подрібнення, одержано вираз для часу подрібнення краплі, який дозволив аналітично встановити граничне значення числа Вебера ($We_{cr} = 5,9$), яке розмежовує різні характери поведінки краплі при її подрібненні. Зокрема, теоретично підтверджено, що для випадку значних чисел Вебера ($We \gg 6$) час «швидкого» подрібнення краплі практично не залежить від значення цього числа.

5. На підставі розгляду ймовірнісного характеру розподілу частинок дисперсної фази за їх розмірами удосконалено математичну модель для

визначення питомої поверхні розділення фаз, яку застосовують під час моделювання процесів хімічної технології та розрахунку відповідного технологічного обладнання. Зокрема, аналітично підтверджено необхідність уведення поправкового коефіцієнта 0,77–0,88 (або запасу 12–23 %), числове значення якого обумовлене законом розподілу частинок дисперсної фази за їх розмірами.

6. Створено науково-теоретичні основи дослідження процесу стікання плівки вловленої рідини в сепараційному каналі при її взаємодії з газокраплинним потоком зі сполученим конвективним теплообміном на охолоджуваних поверхнях контактних елементів. Зокрема, для заданої геометрії каналу і швидкості потоку 4,4 м/с встановлено, що товщина плівки вловленої рідини становить 0,8–1,0 мм, а швидкість її унесення на поверхні розділення фаз змінюється в діапазоні 0,015–0,025 м/с. Максимальне значення цієї швидкості, що відповідає числу Рейнольдса $Re = 31$, перевищує граничне значення, за якого відбувається хвилеутворення на поверхні плівки ($Re_{cr} = 24$). Для запобігання цьому явищу запропоновано встановлення системи дренажних отворів у зоні найбільшої швидкості, а відповідна методика розрахунку зводиться до визначення ефективної площі, що для цього випадку становить $6,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Також встановлено аналітичний вираз для температурного градієнта за товщиною плівки вловленої рідини залежно від чисел Нуссельта, Рейнольдса і Прандтля. Достовірність одержаних результатів підтверджується порівнянням розрахункових та експериментальних значень інтегральних характеристик потоку (витрат суцільної фази).

7. Удосконалено математичну модель нестационарного капілярного підйому рідини, що важливо для точного розрахунку інерційно-фільтрувальних сепараторів і апаратів випарного охолодження. У результаті запропоновано застосування накладених вібрацій для інтенсифікації процесу фільтрації та відведення вловленої краплинної рідини із сепараційного каналу, а також створено наукові основи теорії ґратчастих структур на підставі дискретної та квазіконтинуальної ймовірнісних моделей, що дозволяють досліджувати процес відведення краплинної рідини з фільтрувальних елементів сепараційних пристроїв.

8. На підставі розгляду математичної моделі процесу пневмокласифікації газодисперсних систем встановлено векторні поля швидкостей суцільної й дисперсної фаз і запропоновано регресійні залежності для визначення параметрів процесу за даними числових та експериментальних досліджень. У результаті розв'язання диференціального рівняння дифузії визначено нестационарний розподіл концентрації частинок сипкого матеріалу у виділеному об'ємі зваженого шару. Поширення одержаних закономірностей на споріднені галузі, зокрема на дослідження процесу вимивання поживних речовин з капсульованих мінеральних добрив, дозволило встановити граничне значення кількості вивільненого азоту для добрив з органомінеральним покриттям, яке становить 35–120 мг/кг.

9. За допомогою проведеного аналізу динаміки контактної взаємодії рухомих елементів механічного привода обертового віброгранулятора встановлено існування полігармонічного спектра реакції досліджуваної динамічної системи, що унеможливує застосування таких приводів для забезпечення необхідних характеристик процесу розпаду струменів із подальшим одержанням монодисперсних крапель і формуванням гранул. Це дало можливість розробити рекомендації щодо вибору механізму передавання обертального руху до гранулятора та створити математичну модель процесу віброгрануляції, що описує процес передавання енергії від механічного збудника коливань до плаву рідини, в результаті реалізації якої створено методику оцінювання жорсткісних і демпфувальних характеристик взаємодії елементів гідромеханічної системи. У результаті дослідження механізму вібраційного впливу на краплинну рідину в процесі віброгрануляції одержано аналітичні вирази, які дозволяють визначати розміри основних крапель та їх супутників, а також встановлено граничне значення довжини хвилі, яка впливає на дисперсний склад отримуваних крапель (гранул) і пояснює існування різних режимів диспергування. Зокрема, вібраційний вплив із частотами 220–240 Гц призводить до утворення основних крапель і супутників діаметрами 0,9–1,0 мм. Збільшення частоти супроводжується зменшенням діаметрів основних крапель і супутників до 0,8–0,9 мм та утворенням вторинних супутників діаметром 0,2 мм. У діапазоні частот 500–520 Гц установлюється монодисперсний режим розпаду струменя. Із подальшим зростанням частоти відбувається полідисперсний розпад струменя рідини, а збільшення частоти вібрацій до 800 Гц призводить до розпилення струменя з утворенням великої кількості вторинних сателітів.

10. Запропоновано і захищено патентами України окремий клас нових, енергоефективних способів і пристроїв сепарації краплинної рідини з газодисперсного потоку, що дозволяють досягти високого значення ефективності розділення в широкому діапазоні зміни швидкості (2–15 м/с) за рахунок динамічного регулювання гідравлічного опору, а також запобігти потраплянню критичних об'ємів рідини до сепараційного обладнання та виходу на пробкові режими роботи. Розроблено методику визначення необхідної кількості блоків сепараційних пристроїв за ефективністю вловлювання плівкової рідини, а також узагальнену методику визначення ефективності гідромеханічних і тепломасообмінних процесів. Розроблені наукові положення і рекомендації використано під час підготовки монографій «Методи ідентифікації параметрів математичних моделей коливальних процесів» і «Dynamic analysis of centrifugal machines rotors with combined using 3D and 2D finite element models» та підручника «Hydroaeroelasticity», а одержані наукові результати і практичні рекомендації впроваджені у виробничу діяльність ТОВ «Пром-Енерго Продукт» (м. Харків) та впроваджені у навчальний процес Сумського державного університету, зокрема за темами «Гідродинамічні показники двофазних потоків тепломасообмінного, грануляційного та сепараційного обладнання» (ДР № 0115U002551) та «Розробка підігрівача-деемультатора типу

«HEATER–TREATER» установки підготовки нафти» (договір № 51.18-04.15.СП) на замовлення ПАТ «Укрхімпроект» (м. Суми).

Основні умовні позначення

A – амплітуда, м; $\{A\}$ – вектор амплітуд реакції; A_i, B_i – константи; \bar{A}_B^{res} – безрозмірна резонансна амплітуда; a, m, n, α – оцінювані параметри; a – амплітуда віброшвидкості, м/с; питома поверхня розділення фаз, м²/м³; a_0 – віброприскорення, м/с²; $a_{0, 12, 21, 22}$ – коефіцієнти характеристичного полінома; B – ширина, м; Bt – безрозмірний критерій впливу сили Бассе; $[C]$ – матриця жорсткості; $C_{1,2}, C_B$ – коефіцієнти; Cr_s – безрозмірний критерій; c – концентрація; c_0, c^* – початкова і гранична концентрації; c_3 – оцінюваний параметр, 1/м; c_L – жорсткість, Н/м; D – гідравлічний діаметр, м; $\{D\}$ – вектор амплітуд; d_c, d_f – середній діаметр частинок грубої та дрібної фракцій, м; d_{cr} – граничне значення діаметра, м; d_p – діаметр частинок, м; f – частота турбулентних пульсацій, Гц; f_0 – питома амплітуда, м/с²; f_B – питома сила Бассе, м/с²; g – прискорення вільного падіння, м/с²; H – функція Хевісайда; Ho – число гомохронності; h – ширина (висота), м; h_∞ – максимальна висота капілярного підйому, м; i – уявна одиниця; i, k, p – номер експерименту; i_0 – спеціальна функція; j – номер шару; k, k_c – емпіричні параметри; L – довжина, м; L_{cr} – граничне значення довжини, м; L_S^{max} – максимальна ширина жолоба, м; $[M]$ – матриця інерції; m_B – маса корзини, кг; N, P – кількість експериментів; N_{min} – мінімальна кількість блоків; Nu – критерій Нуссельта; n – безрозмірна довжина; n_L – коефіцієнт згасання, 1/с; \bar{n}_L – безрозмірний коефіцієнт згасання; Pe – число Пекле; $p_{1,2}$ – показники степеня; q_0 – питома витрата, м²/с; R – радіус, м; Re – число Рейнольдса; \bar{r} – безрозмірний радіус, м; \bar{r}_*, \bar{r}_{**} – характерні значення; T – температура, °С; T_a – період, с; $T_{p,r}$ – час вимивання, с; T_s – час подрібнення, с; T_w – температура стінки, °С; ΔT_0 – різниця температур, °С; t_g – час осадження, с; t_w – час уловлювання, с; U^l, V^l – компоненти пульсаційної швидкості, м/с; \bar{u}, \bar{v} – компоненти осередненої швидкості, м/с; u_0 – швидкість на вході, м/с; u_{cr} – критична швидкість, м/с; u_p, v_p – компоненти швидкості, м/с; u_s, w_s – швидкість на поверхні контакту фаз, м/с; \bar{v}_r, \bar{v}_z – безрозмірні компоненти швидкості; \bar{v}_{r0} – безрозмірна амплітуда; w – середня швидкість, м/с; w_{z0} – швидкість на вході, м/с; w_x, w_z – компоненти швидкості, м/с; $\{X\}$ – вектор оцінюваних параметрів; $\Delta X_T, \Delta Y_T$ – компоненти кроку, м; x – параметр інтегрування; x, y, z – координати, м; x_k, y_k – параметри ефективності; x_n – координати, м; $\{Y\}$ – вектор зовнішньої дії; y – параметр ефективності; y_0 – початкова координата, м; y_v – зона вібраційного впливу, м; z_0 – висота шару, м; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м² · К); α, μ_B – відношення мас; β – фактор інерції, 1/с; β_k – показник степеня; δ, δ_0 – товщина плівки, м; ε_j – коефіцієнт неоднорідності; ζ – коефіцієнт опору; η – безрозмірний параметр; η_g – ступінь обтікання; η_p – ступінь захоплення; η_t – ефективність впливу; η_{v0} – безрозмірний параметр; θ – кут змочування, рад; κ_1, κ_2 – безрозмірні параметри; Λ – функція провідності; λ – хвильовий параметр, 1/м; λ_T – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м · К); коефіцієнт втрат на тертя; $\bar{\lambda}$ –

модифікований коефіцієнт втрат на тертя; μ – динамічна в'язкість, Па · с; ν – кінематична в'язкість, м²/с; ξ – безрозмірна глибина; $\rho, \rho_{a,p}$ – густина, кг/м³; σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м; τ – дотичне напруження, Н/м²; $\varphi_{3,4}$ – зсуви фаз, рад; χ – допоміжний параметр; ψ – логарифмічний коефіцієнт; Ω – критична частота, рад/с; ω, ω_0 – частота, рад/с; $\bar{\omega}_0$ – безрозмірна частота, рад/с; ω^* – власна частота, рад/с; ω_B, ω_L – парціальні частоти, рад/с; $\bar{\omega}_L$ – безрозмірна парціальна частота.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації:

1. Pavlenko I., Simonovskiy V., Pitel' J., Demianenko M. Dynamic analysis of centrifugal machines rotors with combined using 3D and 2D finite element models : monograph. Lüdenscheid : RAM-VERLAG, 2018. 145 p. ISBN 978-3-942303-64-4.

Здобувач уточнив математичні моделі коливань гідромеханічних систем.

2. Павленко І. В., Симоновський В. І. Методи ідентифікації параметрів математичних моделей коливальних процесів : монографія. Суми : Сумський державний університет, 2020. 145 с. ISBN 978-966-657-800-9.

Здобувач створив новий метод оцінювання параметрів математичних моделей гідромеханічних процесів.

3. Ляпощенко О. О., Павленко І. В., Усик Р. Ю., Дем'яненко М. М. Моделювання процесів сепарації та розробка методики розрахунку трифазного сепаратора. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. Серія «Технічні науки»*. 2015. Т. 1, № 47. С. 62–66.

Здобувач дослідив можливість застосування динамічних сепараційних пристроїв для розділення багатокомпонентних гетерогенних систем.

4. Дем'яненко М. Н., Ляпощенко А. А., Павленко І. В., Склабинский В.И. Решение уравнений Навье-Стокса и задачи гидроаэроупругости для процессов сепарации в криволинейных каналах. *Вісник ХНУ ім. В. Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. 2015. № 27. С. 53–64.

Здобувач одержав окремих розв'язок рівняння гідродинаміки задачі гідроаероупругості у криволінійному каналі сепараційного пристрою.

5. Павленко І. В., Симоновський В. І., Питель Я., Вербовой А. Е., Дем'яненко М. Н. Исследование критических частот ротора центробежного компрессора с учётом жёсткости опор и уплотнений. *Журнал інженерних наук*. 2017. Т. 4, № 1. С. С1–С6.

Здобувач створив методику визначення критичних частот коливань роторних систем з урахуванням жорсткісних характеристик опор.

6. Pavlenko I. V., Liaposhchenko O. O., Demianenko M. M., Starynskyi O. Ye. Static calculation of the dynamic deflection elements for separation devices. *Journal of Engineering Sciences*. 2017. Vol. 4 (2). P. B19–B24.

Здобувач запропонував загальну постановку задачі для створення математичної моделі статичного розрахунку відбійних елементів.

7. Ляпощенко О. О., Іванов В. О., Павленко І. В., Дем'яненко М. М., Старинський О. Є., Ковтун В. В. Оптимізаційне компонування фазних розділювачів з застосуванням модульних сепараційних пристроїв. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. Серія «Технічні науки»*. 2018. Т. 82, № 1. С. 128–133.

Здобувач створив теоретичні основи моделювання гідродинаміки потоку в сепараторі та провів узагальнення результатів чисельного дослідження.

8. Varukha D. A., Smirnov V. A., Edl M., Demianenko M. M., Yukhymenko M. P., Pavlenko I. V., Liaposhchenko O. O. Modelling of separation and air classification processes of aerodisperse systems in the shelf device. *Journal of Engineering Sciences*. 2018. Vol. 5 (1). P. F5–F9.

Здобувач удосконалив методику проведення чисельного моделювання процесу розділення механічної суміші у гравітаційному пневмокласифікаторі.

9. Pavlenko I. V., Yukhymenko M. P., Lytvynenko A. V., Bocko J. Solving the nonstationary problem of the disperse phase concentration during the pneumoclassification process of mechanical mixtures. *Journal of Engineering Sciences*. 2019. Vol. 6 (1). P. F1–F5.

Здобувач створив математичну модель розподілу концентрації дисперсної фази по висоті робочого об'єму пневмокласифікатора.

10. Liaposhchenko O. O., Sklabinskyi V. I., Zavialov V. L., Pavlenko I. V., Nastenko O. V., Demianenko M. M. Appliance of inertial gas-dynamic separation of gas-dispersion flows in the curvilinear convergent-divergent channels for compressor equipment reliability improvement. *Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 233 (1). 012025.

Здобувач розробив математичну модель процесу вібраційної сепарації.

11. Liaposhchenko O., Pavlenko I., Nastenko O. The model of crossed movement and gas-liquid flow interaction with captured liquid film in the inertial-filtering separation channels. *Separation and Purification Technology*. 2017. Vol. 173. P. 240–243.

Здобувач створив уточнену математичну модель стікання плівки рідини, вловленої з газорідного потоку в сепараційному каналі.

12. Pavlenko I., Liaposhchenko A., Ochowiak M., Demyanenko M. Solving the stationary hydroaeroelasticity problem for dynamic deflection elements of separation devices. *Vibrations in Physical Systems*. 2018. Vol. 29. 2018026.

Здобувач обґрунтував можливість розширення сфери застосування сепараційних пристроїв за рахунок гідроаеропружних ефектів.

13. Pavlenko I., Liaposhchenko O., Sklabinskyi V., Ivanov V., Gusak O. Hydrodynamic features of gas-liquid flow movement in a separation device plane channel with an oscillating wall. *Problemele Energeticii Regionale*. 2018. Vol. 3 (38). P. 62–70.

Здобувач створив науково-теоретичні основи дослідження гідромеханіки газодисперсного потоку в каналі з вібрувальною стінкою.

14. Ochowiak M., Wlodarczyk S., Pavlenko I., Janecki D., Krupinska A., Markowska M. Study on interfacial surface in modified spray tower. *Processes*. 2019. Vol. 7 (8). 532.

Здобувач розробив методику визначення площі поверхні тепломасообміну в абсорбційній вежі за даними експериментальних досліджень.

15. Lytvynenko A., Yukhymenko M., Pavlenko I., Pitel J., Mizakova J., Lytvynenko O., Ostroha R., Bocko J. Ensuring the reliability of pneumatic classification process for granular material in a rhomb-shaped apparatus. *Applied Sciences-Basel (Switzerland)*. 2019. Vol. 9 (8). 1604.

Здобувач розробив методику оцінювання параметрів нестационарного процесу розподілу концентрації частинок дисперсної фази.

16. Pavlenko I., Trojanowska J., Ivanov V., Liaposhchenko O. Parameter identification of hydro-mechanical processes using artificial intelligence systems. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 2019. Vol. 2019 (5). P. 19–26.

Здобувач розробив загальний науковий підхід до оцінювання параметрів гідроаеропружної взаємодії елементів сепараційного пристрою.

17. Khovanskyi S., Pavlenko I., Pitel J., Mizakova J., Ochowiak M., Grechka I. Solving the coupled aerodynamic and thermal problem for modeling the air distribution devices with perforated plates. *Energies*. 2019. Vol. 12 (18). 3488.

Здобувач створив методику оцінювання гідравлічних втрат і середньої швидкості потоку через перфоровану оболонку.

18. Pavlenko I., Liaposhchenko O., Pitel J., Sklabinskyi V. Parameter identification of the Basset force acting on particles in fluid flow induced by the oscillating wall. *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*. 2019. Vol. 18 (2). P. 53–63.

Здобувач оцінив силу Бассе, яка діє на частинки дисперсної фази.

19. Pavlenko I., Trojanowska J., Gusak O., Ivanov V., Pitel J., Pavlenko V. Estimation of the reliability of automatic axial-balancing devices for multistage centrifugal pumps. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 63 (1). P. 52–56.

Здобувач запропонував методику оцінювання вібраційного стану ротора.

20. Sklabinskyi V., Liaposhchenko O., Pavlenko I., Lytvynenko O., Demianenko M. Modelling of liquid's distribution and migration in the fibrous filter layer in the process of inertial-filtering separation. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. Springer, Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019. P. 489–497.

Здобувач розв'язав задачу міграції рідини у фільтрувальному шарі.

21. Pavlenko I., Trojanowska J., Ivanov V., Liaposhchenko O. Scientific and methodological approach for the identification of mathematical models of mechanical systems by using artificial neural networks. *Springer, Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2019. Vol. 505. P. 299–306.

Здобувач розробив методику оцінювання параметрів гідроаеропружної взаємодії елементів сепараційного пристрою.

22. Pavlenko I., Ivanov V., Kuric I., Gusak O., Liaposhchenko O. Ensuring vibration reliability of turbopump units using artificial neural networks. *Advances in Manufacturing II. Vol. 1 «Solutions for Industry 4.0. Lecture Notes in Mechanical Engineering»*. Cham : Springer, 2019. P. 165–175.

Здобувач запропонував методику визначення вібраційного стану ротора.

23. Liaposhchenko O., Pavlenko I., Demianenko M., Starynskyi O., Pitel J. The methodology of numerical simulations of separation process in SPR-separator. *CEUR Workshop Proceedings*. 2019. Vol. 2353. P. 822–832.

Здобувач створив методику чисельного моделювання процесу сепарації двофазної суміші в гідроциклонному сепараторі.

24. Liaposhchenko O., Pavlenko I., Ivanov V., Demianenko M., Starynskyi O., Kuric I., Khukhryanskiy O. Improvement of parameters for the multi-functional oil-gas separator of “Heater-Treater” type. *2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications*. 2019. P. 66–71.

Здобувач створив методику чисельного моделювання процесу розділення компонентів сумішей вуглеводнів у нафтогазовому сепараторі.

25. Liaposhchenko O., Pavlenko I., Monkova K., Demianenko M., Starynskyi O. Numerical simulation of aeroelastic interaction between gas-liquid flow and deformable elements in modular separation devices. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham : Springer, 2020. P. 765–774.

Здобувач запропонував загальний підхід до створення методики моделювання гідроаеропружної взаємодії сепараційних елементів із потоком.

26. Vakal V., Pavlenko I., Vakal S., Hurets L., Ochowiak M. Mathematical modeling of nutrient release from capsulated fertilizers. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. 2020. Vol. (Online). P. 1–7. DOI: 10.3311/PPch.14100.

Здобувач розв'язав нестационарне рівняння дифузії гранульованих азотовмісних добрив у процесі їх вимивання з ґрунту.

Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації:

27. Ляпощенко О. О., Павленко І. В., Усик Р. Ю., Дем'яненко М. М. Моделювання процесів сепарації та розробка методики розрахунку трифазного сепаратора. *Інноваційні енерготехнології: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції*. Одеса, 2015. С. 241–245.

28. Liaposhchenko O. O., Pavlenko I. V., Demyanenko M. M., Starynskyi O. E. Improving the reliability and increasing efficiency of multi-functional energy efficient three-phase separators of Heater-Treater type. *Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції*. Івано-Франківськ, 2016. С. 137–142.

29. Liaposhchenko O., Nastenko O., Pavlenko I., Demianenko M. Mechanical design of multi-operated oil and gas separator of heater-treater type. *Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Івано-Франківськ, 2017. С. 98.

30. Pavlenko I., Nastenko O. Modelling of the associated heat transfer under the inertia-filtering separation by the condensation. *Praktyczne Aspekty Inżynierii Chemicznej (PAIC 2017)*. Poznan, 2017. P. 127–129.

31. Ляпощенко О. О., Склабінський В. І., Зав'ялов В. Л., Павленко І. В., Настенко О. В., Дем'яненко М. М. Застосування інерційної газодинамічної

сепарації газодисперсних потоків в криволінійних каналах для підвищення надійності компресорного обладнання. *Герметичність, вібронадійність і екологічна безпека насосного і компресорного обладнання «ГЕРВІКОН + НАСОСИ-2017»* : збірник доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції. Суми, 2017. С. 159–170.

32. Vashyst B. V., Pavlenko I. V. Phenomena of non-stationary oscillations in elements of centrifugal machines. *Прикладні науково-технічні дослідження: праці II Міжнародної науково-практичної конференції*. Івано-Франківськ, 2018. С. 62.

33. Liaposhchenko O. O., Pavlenko I. V., Demianenko M. M., Starynskyi O. Ye. Hydrodynamics simulation and forecasting the efficiency of separation equipment oil stabilization unit of Gnidyntsy gas processing plant. *Machines, Equipment and Materials for Oil and Gas Production Increase: Proceedings of the 2nd International Scientific and Technical Conference*. Ivano-Frankivsk, 2018. P. 340–342.

34. Ostroha R., Yukhymenko M., Lytvynenko A., Bocko J., Pavlenko I. Granulation process of the organic suspension: fluidized bed temperature influence on the kinetics of the granule formation. *International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (DSMIE-2018)* : Book of Abstracts. Sumy, 2018. P. 114.

35. Ляпощенко О. О., Павленко І. В., Іванов В. О., Дем'яненко М. М., Старинський О. Є. Розробка конструкторсько-технологічної класифікації модульних сепараційних пристроїв. *Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво* : матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції. Краматорськ, 2018. С. 120–122.

36. Ляпощенко О. О., Павленко І. В., Дем'яненко М. М., Старинський О. Є., Ковтун В. В., Голохвост О. О. Застосування методів обчислювальної гідродинаміки до оптимізації конструкцій модульних сепараційних пристроїв багатофазних розділювачів. *Прикладні науково-технічні дослідження* : матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. Івано-Франківськ, 2019. С. 132.

37. Merzliakov I., Pavlenko I., Chekh O., Sharapov S., Ivanov V. Mathematical modeling of operating process and technological features for designing the vortex type liquid-vapor jet apparatus. *2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (DSMIE-2019)* : Book of Abstracts. Lutsk, 2019. P. 121.

38. Michalak M., Ochowiak M., Pavlenko I., Włodarczak S., Krupińska A. Pęcherzykowo-wirowe rozpylanie cieczy z mieszanym statycznym. *Praktyczne Aspekty Inżynierii Chemicznej (PAIC 2019)*. Poznan, 2019. P. 87–88.

39. Krupinska A., Ochowiak M., Włodarczak S., Markowska M., Szulc T., Pavlenko I. Adiuwanty w zabiegach agrotechnicznych. *III Ogólnopolskie Seminarium Chemii Bioorganicznej, Organicznej i Biomateriałów*. Poznan, 2019. P. 211–213.

40. Павленко І. В., Ляпощенко О. О., Склабінський В. І., Іванов В. О., Гусак О. Г. Моделювання основних і вторинних процесів сепарації

гетерогенних систем. *Промислова гідравліка і пневматика*: матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції Міжнародної асоціації спеціалістів промислової гідравліки і пневматики. Київ, 2019. С. 16–19.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

41. Пат. 102445 Україна, МПК В01D 45/04 (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; заявник і патентовласник СумДУ. № u201505124; заявл. 25.05.2015, опубл. 26.10.2015, Бюл. № 20. – 3 с.

Здобувач запропонував новий спосіб сепарації газокраплинного потоку.

42. Пат. 111039 Україна, МПК В01D 45/00 (2006.01). Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку / О. О. Ляпощенко, О. В. Настенко, І. В. Павленко та ін.; заявник і патентовласник СумДУ. № u201605061; заявл. 06.05.2016, опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20. – 3 с.

Здобувач запропонував новий спосіб сепарації газодисперсного потоку.

43. Пат. 130464 Україна, МПК В01D 45/04 (2006.01). Пристрій для сепарації дисперсної рідини з газового потоку / О. О. Ляпощенко, І. В. Павленко, М. М. Дем'яненко, О. Є. Старинський, В. В. Ковтун; заявник і патентовласник СумДУ. № u201806182; заявл. 04.06.2018, опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23. – 2 с.

Здобувач запропонував пристрій сепарації газодисперсного потоку.

44. Комп'ютерна програма «Critical frequencies of the rotor»: а. с. № 59855, Україна / І. В. Павленко, В. І. Симоновський. Дата реєстрації: 27.05.2015.

Здобувач розробив методику чисельного розрахунку критичної частоти.

45. Комп'ютерна програма «Forced oscillations of the rotor»: а. с. № 61788, Україна / І. В. Павленко, В. І. Симоновський. Дата реєстрації: 23.09.2015.

Здобувач розробив методику чисельного розрахунку вимушених коливань.

АНОТАЦІЯ

Павленко І. В. Науково-теоретичні основи вібраційних процесів у гетерогенних системах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. Сумський державний університет, Суми, 2020. Спеціалізована вчена рада Д 55.051.04.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої науково-технічної проблеми інтенсифікації процесів у сепараційних, класифікаційних і грануляційних пристроях шляхом розроблення науково-теоретичних основ процесу вібраційного впливу на гетерогенні системи, моделювання гідродинаміки сепараційних пристроїв, аналізу впливу сполученого конвективного теплообміну і капілярного руху на ефективність сепарації газоконденсатних систем, запобігання негативній дії вторинних процесів і впливу вібрацій на процес утворення гранул монодисперсного складу. Вперше теоретично обґрунтовано підвищення ефективності сепарації за рахунок вібраційно-фільтрувальних принципів розділення; створено науково-

теоретичні основи дослідження гідроаеропружної взаємодії сепараційних елементів із газорідним потоком; теоретично обґрунтовано існування критичного числа Вебера в процесі вторинного подрібнення краплинної рідини; створено науково-теоретичні основи дослідження процесу стікання плівки рідини зі сполученим конвективним теплообміном на охолоджуваних поверхнях контактних елементів; створено наукові основи теорії гратчастих структур для дослідження процесів сепарації та фільтрації. Удосконалено математичну модель визначення питомої поверхні контакту фаз у процесах хімічної технології та математичну модель процесу передавання енергії від механічного збудника коливань до плаву рідини у віброгрануляторі. Досліджено вібраційний вплив на процес диспергування рідини. Набули подальшого розвитку математичні моделі основних і вторинних процесів у сепараторах і віброгрануляторах. Створено теоретичні основи оцінювання параметрів процесу пневмокласифікації сумішей. Одержані закономірності розширено на методи досліджень процесів грануляції, розпилення рідини та вимивання поживних речовин з капсульованих мінеральних добрив.

Ключові слова: вібраційний вплив, гетерогенна система, сепарація, конвективний теплообмін, вторинне подрібнення, поверхня розділення фаз, пневматична класифікація, вібраційна грануляція.

АННОТАЦІЯ

Павленко І. В. Научно-теоретические основы вибрационных процессов в гетерогенных системах. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. Сумский государственный университет, Сумы, 2020. Специализированный учёный совет Д 55.051.04.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической проблемы интенсификации процессов в сепарационных, классификационных и грануляционных устройствах путём разработки научно-теоретических основ процесса вибрационного воздействия на гетерогенные системы, моделирования гидродинамики модульных сепарационных устройств, анализа влияния процессов сопряжённого конвективного теплообмена и нестационарного капиллярного движения жидкости при фильтрации на эффективность процессов сепарации газоконденсатных систем, а также предотвращения негативного воздействия вторичных процессов и влияния вибраций на процесс образования гранул монодисперсного состава. Впервые теоретически обосновано повышение эффективности сепарации за счёт вибрационно-фильтрующих принципов разделения; созданы научно-теоретические основы гидроаэроупругого взаимодействия сепарационных элементов с газожидкостным потоком; теоретически обосновано существование критического числа Вебера в процессе вторичного дробления капельной жидкости; созданы научно-теоретические основы исследования процесса стекания плёнки жидкости с совмещённым конвективным

теплообменом на охлаждаемых поверхностях контактных элементов; созданы научные основы теории решётчатых структур для исследования процессов сепарации и фильтрации. Усовершенствована математическая модель определения удельной поверхности контакта фаз в процессах химической технологии и математическая модель процесса передачи энергии от механического возбудителя колебаний к плаву жидкости в виброгрануляторе. Исследовано вибрационное воздействие на процесс диспергирования жидкости. Получили дальнейшее развитие математические модели основных и вторичных процессов в сепараторах и виброгрануляторах. Созданы теоретические основы оценивания параметров процесса пневмоклассификации смесей. Полученные закономерности расширены на методы исследования процессов грануляции, распыления жидкости и вымывания питательных веществ из капсулированных минеральных удобрений.

Ключевые слова: вибрационное воздействие, гетерогенная система, сепарация, конвективный теплообмен, вторичное дробление, поверхность раздела фаз, пневматическая классификация, вибрационная грануляция.

ABSTRACT

Pavlenko I. V. Scientific and theoretical foundations of vibrational processes in heterogeneous systems. – Qualifying scientific work on the manuscript rights.

The dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Sciences in Engineering by specialty 05.17.08 – processes and equipment of chemical technology. Sumy State University, Sumy, 2020. Specialized Academic Council D 55.051.04.

The dissertation is devoted to the solution of an urgent scientific and technical problem of processes intensification in separators, classifiers, and prillers by developing the scientific and theoretical foundations of the process of vibrational impact on heterogeneous systems, modeling the hydrodynamics of modular separation devices, analysis of the influence of joint convective heat transfer processes and non-stationary capillary fluid motion during filtration on the efficiency of separation for gas-condensate systems, as well as prevention of harmful effects of secondary processes and the influence of vibrations on the formation of monodisperse granules. For the first time, an increase in separation efficiency due to vibrational and filtering principles of separation has been theoretically justified. Scientific and theoretical foundations of hydroaeroelastic interaction of separation elements with the gas-liquid flow have been developed. The existence of a critical Weber number in the process of secondary crushing of a dropping liquid has been theoretically substantiated. The scientific and theoretical fundamentals of the liquid film downflow have been developed with combined convective heat transfer on the cooled surfaces of contact elements. The scientific foundations of the theory of ceil structures have been created for the study of separation and filtration processes. A formula for determining the specific interfacial surface in the processes of chemical technology has been clarified, and the mathematical model of the process of energy transfer from a vibrational actuator to a fluid melt in a vibrational priller has been

refined. The vibrational impact on the liquid dispersion process has been investigated. The mathematical models of the main and secondary processes in separators and vibrational prillers were further developed. The theoretical foundations for parameter identification of the pneumatic classification process of bulk material have been developed. The proposed approaches have been extended to methods for studying prilling processes, spraying liquids, and nutrient release from encapsulated mineral fertilizers.

Keywords: vibrational impact, heterogeneous system, separation, convective heat transfer, secondary crushing, interfacial surface, pneumatic classification, vibrational prilling.

Підписано до друку 19.05.2020.
Формат 60×90/16. Ум друк. арк. 2,1. Обл.-вид. арк. 1,9. Тираж 100 пр. Зам. № 308.

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