

В І Д Г У К
офіційного опонента на дисертаційну роботу
Ляпоценка Олександра Олександровича “Теоретичні основи
процесів інерційно-фільтруючої сепарації” на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.08 - процеси та обладнання
хімічної технології

(Відгук відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою КМ України від 24.07.2013р. №567 (зі змінами) та складено на підставі вивчення й аналізу дисертаційної роботи, автореферату та опублікованих праць і подається до спеціалізованої вченої ради Д35.052.09)

I. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

1. Актуальність теми дисертації

Сучасний розвиток економіки в умовах жорсткої конкуренції між країнами потребує формування інноваційно орієнтованої науки, яка стає визначальною складовою стійкого розвитку України та вирішальним фактором її економічної безпеки і соціального прогресу. Тому сьогодні необхідно формування відповідних механізмів, пов'язаних з розвитком теоретичних основ технологічних процесів та належним їх апаратурним оформленням, в тому числі таких процесів розділення неоднорідних систем, як інерційно-фільтруюча сепарація газорідних систем. Так, удосконалення техніки та технології очищення побіжного нафтового і природного газу є необхідною умовою якісної підготовки їх до подальшого промислового використання у народному господарстві. Уловлювання з потоку побіжного нафтового і природного газу вуглеводневого конденсату, що містить цінні важкі вуглеводневі компоненти, є перспективою його подальшої переробки з метою підвищення ступеня використання енергоресурсів України.

Розглядаючи роботу промислових сепараторів із сучасних позицій фізико-хімічної гідродинаміки та механіки гетерогенних середовищ, можливо констатувати, що відсутність наукових основ прогнозування поведінки двофазних потоків на основі фізичного, математичного та віртуального комп'ютерного моделювання гідродинамічних процесів є однією із вагомих причин проектування малоефективних сепараційних апаратів і вибору недостатньо виправданих технологічних режимів, а тому представлену до захисту дисертацію слід вважати актуальною та важливою для теорії і практики.

Актуальність роботи доводиться також тим, що вона виконувалась у рамках ряду держбюджетних тематик: «Дослідження вихрових грануляційних та масотеплообмінних пристроїв», «Дослідження гідродинамічних та масотеплообмінних характеристик пристроїв з вихровими та високотурбулізованими одно- та двофазними потоками», «Гідродинамічні показники двофазних потоків тепломасообмінного, грануляційного та сепараційного обладнання», «Дослідження гідродинаміки багатofазних потоків при сепарації та фільтруванні, оптимізація конструкцій промислових сепараторів для нафтогазової та хімічної промисло-

вості» у відповідності до визначених пріоритетних напрямів розвитку науки й техніки на період до 2020 року.

2. Мета і завдання досліджень

В дисертаційній роботі автором сформульовані мета та завдання досліджень, що сформовані на елементах розв'язання важливої науково-прикладної проблеми обґрунтування процесів інерційно-фільтруючої сепарації газодисперсних потоків та створення теоретичних основ моделювання гідродинаміки і тепломасообміну інерційно-фільтруючих газосепараційних пристроїв. Автором також чітко та послідовно сформульовано завдання для досягнення поставленої мети.

3. Методи досліджень.

Дисертант у своїй роботі використовує аналітичні, теоретичні та експериментальні методи досліджень.

Для теоретичних досліджень використані фундаментальні положення механіки рідини та газу, класичні положення теорії гідродинаміки та тепломасообміну, а також сучасні концепції теорії масопередачі, перемішування в рідких середовищах, пограничного шару. Використовувались також методи математичного аналізу та інтегрального обчислення з застосуванням CAS-систем комп'ютерної алгебри, методи експериментальної гідродинаміки, сучасні методи комп'ютерної візуалізації робочих потоків.

Крім того, для опрацювання результатів досліджень використовувались сучасні прикладні математико-статистичні методи обробки експериментальних даних, стендові моделі, що обладнані спеціальними програмними комплексами; методи оптимізації процесів та обчислювальної гідродинаміки, статичного та динамічного математичного моделювання хіміко-технологічних процесів.

4. Наукове значення роботи.

В дисертаційній роботі на основі комплексних теоретичних та експериментальних досліджень розв'язано важливу науково-прикладну проблему наукового обґрунтування процесів інерційно-фільтруючої сепарації газодисперсних потоків та створено теоретичні основи моделювання гідродинаміки і тепломасообміну інерційно-фільтруючих газосепараційних пристроїв, що являє собою нові науково обґрунтовані результати у галузі процесів та обладнання хімічної технології.

Важливим також є подальший розвиток наукових підходів до фізичного моделювання та теоретичних досліджень гідродинамічних процесів, аналіз впливу сполученого міжфазного тепломасообміну на процеси інерційно-фільтруючої сепарації багатоконпонентних газоконденсатних сумішей при інерційно-фільтруючій сепарації газорідних систем, розробка методів розв'язання основних рівнянь гідродинаміки та математичного моделювання гідродинамічних процесів при інерційно-фільтруючій сепарації та фізичної моделі формування і фазової рівноваги високодисперсних газоконденсатних систем в турбулентному потоці газу, яка враховує вплив фазових перетворень на

коалесценцію краплин конденсату та ефективність процесів інерційно-фільтруючої сепарації. Тому є всі підстави вважати, що робота автора має певне наукове значення для хімічної інженерії.

5. Наукова новизна отриманих результатів

На основі проведених досліджень та аналізу теоретичних і практичних проблем механіки суцільних середовищ та процесів сепарації дисперсних систем в апаратах з інтенсивними гідродинамічними режимами автором зроблено важливе для теорії і практики наукове обґрунтування процесів інерційно-фільтруючої сепарації газорідних систем.

Так, вперше автором запропоновано поєднання одночасної взаємодії інерційних та фільтруючих сепараційних елементів і на основі такого підходу було обґрунтовано основні механізми вловлювання дисперсних часток інерційно-фільтруючими сепараційними елементами та визначено основні закономірності процесів та інерційного захоплення краплин, їх осадження на волокнах фільтруючого елемента та плівку вловленої рідини, стікання плівки в полі гравітаційних сил.

Також важливим та оригінальним з наукової точки зору є виконаний аналітичний розв'язок рівнянь руху і нерозривності потоку відносно складових локальних швидкостей газового потоку для окремого випадку плоскої вісенесиметричної течії в криволінійному каналі зі стінками синусоїдального профілю.

До наукового здобутку автора слід також віднести розроблені цікаві методи розв'язання основних рівнянь гідродинаміки та математичного моделювання процесів при інерційно-фільтруючій сепарації, на основі яких вперше отримано розв'язок рівнянь руху газодисперсного середовища, що дозволяє визначити траєкторії руху краплин і здійснити оптимізаційне геометричне профілювання криволінійних каналів з фільтруючими елементами, а також вперше визначено основні гідродинамічні характеристики сепараційних елементів інерційно-фільтруючих сепараторів за результатами експериментальних досліджень модельних зразків криволінійних сепараційних каналів.

За результатами роботи слід також зазначити подальший розвиток методики розрахунку газодинамічних сепараторів для встановлення ефективних конструктивних та режимних параметрів їх роботи, а також моделі криволінійної течії газодисперсного потоку, що надає можливість встановлювати спосіб розподілу крапель по розмірах та оцінювати ефективність сепарації після кожної послідовної криволінійної ділянки сепараційного каналу. Про новизну таких результатів свідчать патенти на винахід та відсутність літературних джерел з аналогічною інформацією.

Всі викладені наукові положення не повторюють результатів кандидатської дисертації. Зв'язок з кандидатською роботою проглядається в логічному продовженні досліджень відповідних процесів.

6. Практичне значення отриманих результатів роботи

Опрацьовані автором результати теоретичних та експериментальних досліджень та сформульовані в роботі наукові положення логічно знайшли своє практичне втілення, що підтверджується відповідними актами впроваджень.

Конкретні практичні рекомендації автора стали основою промислових випробувань на машинобудівних заводах, підприємствах хімічної промисловості і нафтогазового комплексу України та іноземних держав (ПАТ «Сумське НВО ім. М.В.Фрунзе», АТ «Сумський завод «Насосенергомаш», холдинг «Група ГМС», Група «ЛУКОЙЛ», концерн «Укрросметал», ТОВ НПВ «Машхімнафтосервіс», ПАТ «Укрхімпроект», ТОВ «Агросервіс», ТОВ «Сумифітоформація», ПрАТ «Укргазвидобуток», Представництво «Регал Петролеум Корпорейшн Лімітед» та інші). Економічне обґрунтування щодо впровадження результатів роботи акцентує увагу на строках окупності нових газосепараторів інерційно-фільтруючого типу — до 3х років, а у випадку модернізації існуючого сепараційного обладнання — до 1,5 року з річним економічним ефектом від модернізації сепаратора продуктивністю 50 тис. нм³/годину природного газу близько 3 млн. грн./рік.

Важливим практичним втіленням також слід вважати впровадження результатів роботи в навчальний процес Сумського державного університету для дисциплін «Технологічні основи нафто- та газопереробки», «Обладнання газота нафтопереробних виробництв», «Технологічні лінії та комплекси нафтопереробних виробництв», «Процеси та обладнання газороздільних установок», а також при підготовці двох навчальних посібників.

7. Особистий внесок здобувача

Вивчення дисертаційної роботи, автореферату та опублікованих праць дає підставу погодитись, що особистий внесок дисертанта в основні положення дисертації містить обґрунтування ідей та наукових положень процесів інерційно-фільтруючої сепарації газодисперсних потоків та створення теоретичних основ моделювання гідродинаміки і тепломасообміну інерційно-фільтруючих газосепараційних пристроїв, програм та методик експериментальних досліджень і дослідно-промислових випробувань, узагальнення отриманих результатів і формулювання висновків, розробці науково обґрунтованих практичних рекомендацій та інженерних методик розрахунку, впровадженні науково-технічних розробок у виробництво та навчальний процес. Аналіз літературних джерел, проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз отриманих результатів, формування висновків та пропозицій, підготовка матеріалів досліджень до опублікування та виступи з доповідями на конференціях виконано автором самостійно.

Внесок у підготовку кожної публікації зі співавторами відображений в авторефераті і є визначальним. Впровадження результатів роботи та експериментальні дослідження останніх років виконані у співавторстві з консультантом д.т.н., професором Склабінським В.І. та у процесі керування науковою роботою колективу аспірантів дисертанта у складі Логвина А.В., Настенко О.В., Аль-Роммахі М.М.

Отже, особистий внесок здобувача, що заявлений у вступі дисертації, не викликає сумніву.

8. Апробація результатів роботи.

Поданий у рефераті перелік 27 конференцій різного рівня, на яких доповідались результати роботи, та перегляд тез цих конференцій свідчить про досить повну і широку апробацію результатів роботи.

9. Мова і стиль роботи

Дисертаційна робота написана сучасною українською мовою, послідовно та логічно. В основному оформлення дисертації відповідає вимогам, що ставляться до робіт такого рівня. Автореферат достатньо повно та ідентично розкриває зміст дисертації.

Тематика дисертації та представлені в ній дослідження відповідають спеціальності 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології.

10. Публікації та автореферат

Ознайомлення з публікаціями свідчить, що вони містять основні положення дисертації, мають цінну наукову інформацію. Матеріали дисертаційної роботи опубліковані у навчальному посібнику, 70 друкованих працях (1 - одноосібно), у тому числі одна публікація в колективній монографії, 20 статей у наукових фахових виданнях України та 12 публікацій у фахових видання іноземних держав, у тому числі одна публікація у електронному науковому фаховому виданні та 18 статей у виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз (у тому числі 3 статті у виданнях, які обліковуються наукометричними базами Scopus та Web of Science), 27 публікацій у матеріалах та працях конференцій. Отримано 15 патентів на корисну модель, 2 патенти на винахід України, 1 міжнародний патент на винахід.

Це у достатній мірі відповідає вимогам щодо кількості та рівня публікацій. Наведений у публікаціях матеріал повністю відображає результати дисертаційної роботи. Зміст автореферату стисло відображає зміст і основні положення дисертаційної роботи.

11. Структура дисертації

Структура дисертаційної роботи відповідає загальноприйнятій, а саме вступ, шість розділів, висновки, список літератури, що включає 425 найменувань вітчизняних і закордонних авторів, додатків на 90 сторінках. Основний текст роботи викладено на 325 сторінках і включає 110 рисунків та 20 таблиць.

II. АНАЛІЗ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Вступ. Містить всю необхідну інформацію про дисертаційну роботу, передбачену Порядком присудження наукових ступенів. Ця інформація наведена в I розділі цього відгуку. Разом з тим при обґрунтуванні актуальності теми дисертації слід було б більше навести інформації про проблеми в промисловості щодо сепарації дисперсних систем.

Розділ 1. «ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ». Автор аналізує теоретичні і практичні проблеми механіки суцільних середовищ та процесів сепарації дисперсних систем в апаратах з інтенсивними гідродинамічними режимами, а також зосереджує увагу на значущості цих процесів в науці та техніці. Існуючі теоретичні та практичні проблеми механіки суцільних середовищ обґрунтовує та систематизує з посиланням на чисельні фундаментальні літературні джерела з різних галузей науки.

Автор акцентує, що в умовах інтенсивних гідродинамічних режимів рух неоднорідних гетерогенних дисперсних систем відрізняється від ламінарного режиму наявністю флуктуацій, нерегулярних пульсацій випадкового хаотичного характеру з моментальною зміною напрямку локальних швидкостей і, як наслідок, сприяє інтенсивному перемішуванню елементарних об'ємів несучої фази та збільшує швидкість осадження дисперсних часток на граничних повздовжніх стінках каналів. Результати літогляду переконують у відсутності на сьогодні теоретичних уявлень про процеси інерційно-фільтруючої сепарації, що підтверджує безперечну актуальність та важливість тематики дисертації.

Крім того, аналізуючи сучасні методи та специфіку розділення двофазних та трьохфазних багатокомпонентних сумішей та способи підвищення ефективності сепарації, автор робить важливий висновок, що висока продуктивність та ефективність таких апаратів забезпечується доцільним поєднанням відповідних сепараційних вузлів, принцип дії яких заснований на різних механізмах розділення гетерогенних багатокомпонентних систем (відстоювання, інерційне вловлювання, фільтрування і т.п.). Зазначається, що таке поєднання є послідовним та з використанням різних механізмів розділення гетерогенних систем. Однак, гідравлічний опір таких сепараторів зростає прямо пропорційно кількості сепараційних пристроїв, що об'єднані в одному апараті.

На підставі аналізу розглянутих основних відомих способів сепарації з урахуванням їх переваг та недоліків автор наводить цікавий, розроблений науковцями Сумського державного університету, новий окремий клас інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв (рис.1.14), які поєднують кращі переваги існуючих сепараційних пристроїв (відцентрових, насадкових, сітчастих, фільтрів), заснованих на принципово нових рішеннях організації руху та взаємодії двофазних потоків, що знов підтверджує правильно обраний автором напрямок розвитку нових способів інерційно-фільтруючої сепарації, які задовольняють більшості з основних сучасних викликів та вимог до сепараційних технологій.

Розглядаючи фізичні умови утворення аеродисперсних систем та модель формування високодисперсної краплинної рідини у потоці газу, автор ставить задачу провести якісну оцінку параметрів газорідних систем в умовах різних механізмів їх формування, також відзначає, що основними способами утворення аерозолів є процеси конденсації та диспергування, а основними механізмами формування крапель у турбулентному потоці газу за відсутності конденсації є процеси подрібнення та коагуляції, які відбуваються одночасно. Такі процеси та явища аналізуються автором на всіх масштабних рівнях.

Приділено увагу в розділі також важливому питанню, в контексті заявленої теми дисертації, механіці аеродисперсних систем та динаміці турбулентних газодисперсних потоків. Аналізуючи модель організації руху та взаємодії потоків у жалюзійному інерційно-фільтруючому сепараційному пристрої, автор приходить до висновку, що дослідження механіки газодисперсних систем може бути зведене до вивчення руху окремих часток під дією різних зовнішніх сил у суцільному середовищі, а потім за необхідності вводити поправку на взаємодію між частками.

З огляду на зазначене, опрацювання автором фундаментальних теоретичних та експериментальних досліджень в галузях хімічної технології дозволило автору зібрати великий інформаційний матеріал, достатній для узагальнення та виділення основних закономірностей протікання досліджуваних механізмів, що супроводжують процеси інерційно-фільтруючої сепарації газодисперсних потоків.

Загалом розділ написано чітко, логічно, зрозуміло, опрацьована значна кількість літературних джерел.

Розділ 2. «МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ».

Автором обґрунтовано вибір напрямку досліджень та загальну його методику. Програма наукових досліджень наведена у вигляді логічної схеми послідовних структурних елементів. **Але чомусь автор знову, як і у вступі до дисертації, переходить до аналізу актуальності обраної теми (с.69), вказує на необхідність літогляду і т.д. Це ж не методичні вказівки про те, як робити дисертацію? Не зрозуміло навіщо про це писати. Далі це ж стосується і порівняльної оцінки методів вирішення задач, в тому числі і аналізу існуючих методів обчислювальної гідродинаміки. Тут автор також пише, що «...слід приділяти увагу грамотному та обґрунтованому вибору математичних моделей...», а хіба можуть бути в докторській дисертації інші варіанти? Таким порівнянням здається місце у літогляді. І від цього розділ має близько 60 сторінок, які могли б бути скороченими.**

Приведені в розділі методи експериментальної гідродинаміки у сукупності з методами прямого спостереження, а також наведені методи дисперсного аналізу високодисперсних систем представлені логічно та зрозуміло.

Наведено цікаві гістограми розподілу часток за розмірами та схема лазерного дифракційного аналізатора.

Способи і методи визначення вологості та складу сумішей газів, методика визначення краплинного унесення рідини з газовим потоком, схеми лабораторних установок та методики прогнозування ті оцінки розрахункової ефективності сепарації дисперсних систем також не викликають сумніву і не дають підстав для зауважень.

Розділ 3. «ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕОРІЇ ІНЕРЦІЙНО-ФІЛЬТРУЮЧОЇ СЕПАРАЦІЇ АЕРОДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ».

В розділі автор спочатку обґрунтовує необхідність створення математичних моделей для виявлення основних закономірностей процесів інерційно-фільтруючої сепарації та аналізує особливості такого процесу для криволінійних каналів. З метою побудови диференціальних рівнянь руху турбулентного газового потоку в цих каналах автор робить припущення, що криволінійний канал складається з напівкілець, а криволінійні ділянки мають постійні внутрішній і зовнішній радіуси і наводить чітку розрахункову схему криволінійного каналу. Такий підхід обґрунтовується тим, що найбільш оптимальний гідродинамічний профіль криволінійних сепараційних каналів забезпечують стінки жалюзі синусоїдальної форми, але при спробі математичного опису руху потоків по таких каналах існують труднощі з аналітичним розв'язком рівнянь Нав'є-Стокса. Далі пропонується поліноміальне розв'язання диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса та наводиться чисельний приклад розрахунку з конкретними параметрами у відповідності до конструктивних розмірів модельного експериментального зразка інерційно-фільтруючого сепараційного пристрою та умов проведення фізичного експерименту та аналізується варіант такого розрахунку у вигляді графіку розподілу окружної і радіальної складових компонент швидкості потоку по радіусу r криволінійного каналу (рис.3.2).

Далі автор представляє інший більш загальний, але не менш цікавий спосіб розв'язання диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса за допомогою модифікованих степеневих рядів. Функція розподілу радіальної складової швидкості подається у вигляді нескінченного ряду. Тут автор також демонструє свої високі математичні здібності і наводить переконливий в цьому випадку чисельний розв'язок отриманих рівнянь для модельного експериментального зразка інерційно-фільтруючого сепараційного пристрою у вигляді графічної залежності зміни гідравлічного опору по довжині криволінійного сепараційного каналу (рис.3.3). Таке рішення уможливорює прогнозування перепаду тисків після кожної ділянки криволінійного каналу для різних умов роботи сепаратора.

Автором розглядаються диференціальні рівняння руху дисперсних часток в турбулентному газовому потоці в криволінійних сепараційних каналах. Тут слід також погодитися з автором, що теорія криволінійного руху часток є порівняно простою лише в області при малих числах Рейнольдса. І тільки застосування комп'ютерного моделювання для чисельного інтегрування систем диференціальних рівнянь надає можливість розв'язання таких задач у широкому діапазоні умов однозначності. З врахуванням наведеного ґрунтовного аналізу такого підходу для опису руху дисперсних часток з газовим потоком у зоні сепарації в криволінійних сепараційних каналах вибрано за основу загальні диференціальні рівняння руху в полярній системі координат. В результаті отримано розподіл полів тангенціальної та радіальної складових швидкості руху часток. Все це широко демонструється відповідними графічними залежностями (рис. 3.5-3.6), які підтверджують адекватність математичних моделей руху потоку суцільної фази і дисперсних часток у гравітаційно-інерційній зоні сепарації

криволінійних каналів жалюзійних блоків інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв.

У цьому розділі також заслуговує на увагу модель утворення та взаємодії плівки вловленої рідини з газовим потоком в криволінійних інерційно-фільтруючих сепараційних каналах. У преамбулі до цього підрозділу автор на основі аналізу робіт інших авторів робить важливий висновок про те, що в літературі об'єктами є двофазні плівкові течії вздовж поверхні труб з протитечійною схемою руху потоків, низхідна та висхідна прямотечія.

Розв'язання задачі моделювання течії і взаємодії газокраплинного потоку та плівки рідини, що стікає по стінках криволінійного каналу, в тривимірній постановці представляє складну наукову проблему. Тому для визначення середньої товщини плівки рідини, яка стікає по стінках сепараційних каналів під дією сили тяжіння, автором пропонується спочатку розглянути рівняння Нав'є-Стокса в умовах усталеного одномірного ламінарного потоку, а потім розв'язання ускладненої задачі моделювання руху рідини в плівці з урахуванням впливу газового потоку, який рухається перехресно вздовж стінки по каналу. Така задача автором вирішується з демонстрацією відповідної розрахункової схеми взаємодії газокраплинного потоку і плівки рідини на прямолінійній ділянці сепараційного каналу, розрахункової схеми тонкошарового фільтруючого елемента на криволінійній ділянці сепараційного каналу та розрахункової схеми нескінченно малого гнучкого пружного елемента стінки в сепараційному каналі з поступовим, переконливим і оригінальним математичним супроводом.

Розділ закінчується ґрунтовним логічним висновком. Суттєвих зауважень немає.

Розділ 4. «ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ІНЕРЦІЙНО-ФІЛЬТРУЮЧІЙ СЕПАРАЦІЇ ГАЗОРІДИННИХ СИСТЕМ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІНЕРЦІЙНО-ФІЛЬТРУЮЧИХ ГАЗОСЕПАРАТОРІВ».

В розділі відзеркалено питання моделювання гідродинаміки руху робочого потоку в сепараційних каналах та фільтрувальних секціях інерційно-фільтруючих газових сепараторів. З цією метою автор умовно виділяє окремі зони та акцентує увагу на механізмі процесів, що відбуваються в них (подрібнення, коагуляція, седиментація та ін.). Посилаючись на ряд класичних джерел з механіки рідини і газу, механіки аеродисперсних систем, теорії процесів турбулентного перенесення та осадження дисперсних часток стверджує про узгодженість з ними своєї теорії та математичного опису процесів, що наведені у третьому розділі, і з цим слід погодитись.

Так поступово розглядається питання формування потоку газу та краплин рідини у інерційно-фільтруючих газосепараторах. Аналізуючи механізм процесу, автор констатує, що краплі рідини з турбулентних газокраплинних потоків осаджуються в насадкових жалюзійних інерційно-фільтруючих сепараційних секціях в основному під дією сил інерції, а роль турбулентного перенесення краплин відносно незначна. Тому при конструюванні слід особливу увагу при-

ділити вибору профілю гофрованих пластин-жалюзей, що утворюють стінки криволінійних інерційних сепараційних каналів.

Для моделювання та оптимізації структури газового потоку автор пропонує розроблені оригінальні 2D/3D CFD-моделі криволінійних сепараційних каналів різної геометричної конфігурації.

Враховуючи просторовий та неусталений рух реального потоку газу в криволінійних сепараційних каналах насадкових жалюзійних блоків, зроблено ряд обґрунтованих та зрозумілих припущень щодо стаціонарного способу розв'язання задач стосовно руху двомірного газового потоку та стікання плівки рідини змінної товщини по вертикальній поверхні сепараційних каналів. В результаті реалізовано чисельними методами для конкретних умов однозначності відповідні математичні моделі, що дозволяє зрозуміти кілька фундаментальних закономірностей досліджуваних процесів. Важливо, що такі моделі були перевірені на адекватність та ідентифіковано досліджуваним системам на емпіричному рівні з дотриманням основних умов геометричної та кінематичної подібності моделей та руху газодисперсних систем в достатньо широких межах режиму руху потоку ($2300 \leq Re \leq 100000$).

Цікавою виявилася комп'ютерна візуалізація формування потоку газу в криволінійних каналах методами обчислювальної гідродинаміки, що наведена на рис.4.2-4.4 у вигляді спеціальної розрахункової сітки з дискретним за відповідним режимом руху розподілом полів швидкостей.

Характер обтікання робочим потоком сепараційного каналу чітко показано у кольоровому зображенні, що надає змогу відчутти візуально реалії чітко обґрунтованого автором процесу. Відмічені області на відповідних схемах є зонами потенційного диспергування плівки вловленої рідини та вторинного бризкоунесення, що в подальшому підтверджено результатами досліджень автора.

У цьому контексті слід зазначити, що у науці про процеси і апарати належна візуалізація відповідних робочих потоків на всіх стадіях і рівнях процесу вважається певним, так би мовити, науковим мистецтвом, з яким автору поталанило впоратися.

Оригінальним в цьому розділі також відмітимо визначення методом аеродинамічного зондування формування газового потоку та розподілу швидкостей в каналах. В результаті отримано численні дані за складовими швидкості газового потоку на кожній криволінійній ділянці. Приклад такого розподілу швидкостей автором наведено на рис.4.5.

Ґрунтовно описано результати експериментальних досліджень масштабних моделей процесів у сепараційних каналах зі стінками синусоїдального профілю, вловлювання дисперсних часток інерційно-фільтруючими сепараційними елементами та деталізовано описано їх механізм. Така інформація була б корисною, навіть у такому вигляді, для відповідної навчальної літератури.

Наведено розв'язання статистичної задачі з визначення розрахункового розподілу вловлених часток на зовнішній стінці каналу та представлено математично варіант знаходження траєкторій руху (ліній плину) газового потоку. Отримані результати зрозуміло та достатньо повно коментуються розрахунко-

вими лініями плинугазового потоку в криволінійній ділянці сепараційного каналу та траєкторіями руху краплин рідини на рис. 4.11.

Цікавим в розділі виявилось також встановлення оптимальних режимів відведення вловленої рідини для упередження вторинного бризкоунесення, зниження гідравлічного опору та підвищення ефективності сепарації інерційно-фільтруючих газосепараторів, а також запропонована методика вибору волокнистих матеріалів та визначення впливу властивостей фільтруючих елементів на ефективність сепарації газорідних систем.

Відмічено, що ефективність сепарації зростає по мірі зменшення відстані між гофрованими пластинами-жалюзьями та підвищення швидкості руху газопотоку до припустимих граничних значень, після чого починається вторинне унесення краплин.

Також автором дана належна оцінка гідравлічного опору та аналізовано результати прогнозування розрахункової ефективності сепарації високодисперсних систем в інерційно-фільтруючих газосепараторах та виявлено оптимальні геометричні співвідношення основних розмірів криволінійного сепараційного каналу, що є важливим для науки і практики.

Важливо, що отримані результати математичних моделювань підтверджують висунуті автором гіпотези щодо забезпечення ефективною сепарацією краплинної рідини у інерційно-фільтруючих сепараційних каналах. Результати виконаних досліджень були широко висвітлені у достатній кількості публікацій у фахових виданнях. Зауважень немає.

Розділ 5. «АНАЛІЗ ВПЛИВУ СПОЛУЧЕНОГО МІЖФАЗНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ НА ПРОЦЕСИ ІНЕРЦІЙНО-ФІЛЬТРУЮЧОЇ СЕПАРАЦІЇ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ГАЗОКОНДЕНСАТНИХ СУМІШЕЙ»

Розділ автор починає з опису механізму утворення та конденсаційного зростання краплин в турбулентному потоці при адіабатичному розширенні газу, фізичних основ та моделей формування високодисперсної краплинної рідини за механізмами подрібнення та коагуляції в турбулентному потоці. Наведене дуже цікаве, але така інформація в іншому ракурсі була представлена та достатньо проаналізована у попередніх розділах.

Описано фізичні умови утворення багатоконденсатних систем та моделей формування високодисперсної краплинної рідини у турбулентному потоці газу при адіабатичному його розширенні. Такі механізми за певних гідродинамічних та термодинамічних умов процесу згадувались автором раніше, де зазначалось, що для підвищення ефективності сепарації доцільним є порушення фазової рівноваги, що встановилася в газорідному потоці, особливо у випадку багатоконденсатних сумішей.

Такий ефект може бути викликаний зміною температури та тиску системи, але при цьому у потоці можливе зародження дрібних краплин з утворенням газоконденсатних систем. Далі наводиться ретельний аналіз механізму процесу на різних масштабних рівнях з посиланням на відповідні авторські публікації.

Процеси тепломасообміну, що відбуваються при низькотемпературних методах переробки багатокомпонентних вуглеводневих сумішей пояснюються автором з посиланнями на інші джерела, в тому числі на довідкову літературу з хімічних та нафтогазопереробних технологій, але з пояснювальним акцентом на фізичні основи розповсюдження цих методів та визначення впливу міжфазного тепломасообміну на процеси інерційно-фільтруючої сепарації з метою підвищення ступеня розділення багатокомпонентних газоконденсатних сумішей. Але здається достатньо було б привести тільки своє бачення цього питання. Тобто частина матеріалу без втрат знайшла б гідне місце у літогляді.

Цікаво та переконливо представлена на рис. 5.1 порівняльна оцінка промислових технологій низькотемпературної сепарації вуглеводневих газів.

В розділі змістовно з елементами математичного моделювання описано утворення краплинної рідини при охолодженні газової суміші в пристроях попередньої конденсації та сепараційних каналах. Так, з основних рівнянь тепловіддачі отримано вирази для визначення пересичення пари та кількості краплинної рідини, яка конденсувалася при охолодженні газового потоку. Як приклад, рівняння (5.10) дозволяє встановити залежність тиску пари від температури.

Аналізуючи отримані залежності автор зазначає, що максимальна масова концентрація конденсаційного туману досягається при температурі, яка відрізняється від температури, при якій виникає максимальне пересичення пари.

Далі наводяться етапи моделювання конвективного теплообміну при конденсації в охолоджуваних сепараційних каналах. Для цього застосовано підхід, який дозволяє звести систему диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса та конвективного теплообміну Фур'є-Кірхгофа в частинних похідних до двох незв'язаних крайових задач, одну з яких частково розв'язано в розд.3, 4.

Далі знову детально описується механізм перенесення тепла конвекцією в ядрі турбулентного газового потоку, що характеризується інтенсивним перемішуванням за рахунок турбулентних пульсацій з поетапним математичним перетворенням вихідних рівнянь у закон розподілу поля температур у вигляді градієнтного рівняння. Фізика процесу коментується схемою об'ємної та плівкової конденсації на охолоджуваних стінках сепараційного каналу.

В такому ж ключі розглянуто вплив фазових перетворень на ефективність процесів інерційно-фільтруючої сепарації, що слід обов'язково враховувати при проектуванні та експлуатації обладнання газових, газоконденсатних та нафтових родовищ. Як приклад, автор пояснює, що при газовій сепарації підвищенням тиску ступінь утримання важких компонентів знижується, в той же час зростає загальна кількість вуглеводнів, які переходять в рідинну фазу при сепарації, що пов'язано зі збільшенням кількості конденсованої метан-етанової фракції.

В кінці розділу зроблено ряд важливих для практичного використання висновків, що стосуються підвищення ефективності сепарації та збільшення кількості конденсованих компонентів в рідинну фазу з багатокомпонентних газоконденсатних сумішей за рахунок відповідного варіювання тиску, температури та швидкості робочого газового потоку. Пояснення фізики процесу також має ма-

тематичний супровід. Матеріали розділу мають належне місце у публікаціях автора. Розділ виявився цікавим з практичної та наукової точки зору. Зауважень немає.

Розділ 6. «ПРОЕКТУВАННЯ СЕПАРАЦІЙНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ХІМІЧНОЇ ТА НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗЕЙ ПРОМИСЛОВОСТІ. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ»

Разом з тим в розділі представлено оригінальні конструктивні особливості розроблених автором сепараторів, умови їх ефективної експлуатації та логіка практичного використання створеної ним теорії.

Так, заслуговують на увагу такі оригінальні конструкції, як інерційно-фільтруючий жалюзійний пакет; інерційно-фільтруючий пакет з подвійних жалюзей з горизонтальними та вертикальними щілинними отворами, переливними жолобами та дренажними каналами, інерційно-фільтруючий пакет з рухомими елементами, жалюзійний пакет з конфузорними та дифузорними ділянками криволінійних каналів, інерційно-фільтруючий тумановловлювач, інерційно-фільтруючий сепаратор-конденсатор.

Описані автором механізми фільтрування поряд з процесами інерційного вловлювання, а також встановлення фільтруючих елементів в криволінійних каналах інерційно-фільтруючих сепараторів, лягли в основу запропонованих автором нових способів для розділення газорідних потоків в сепараційному та тепломасообмінному обладнанні. Такі інноваційні конструкції та пропозиції захищені відповідними патентами на винахід, один з яких на міжнародному рівні.

Цікаво та переконливо представлено результати впровадження та особливості експлуатації інерційно-фільтруючого сепараційного обладнання.

Разом з тим у висновках до розділу (п.5) автор чомусь сам себе розхвалює «Отримані наукові результати та практичні рекомендації представляють високу науково-практичну цінність та перспективи...». Краще цю місію залишити виконати офіційним опонентам, тому що це не є висновком до дисертації. Пункт зайвий.

Отже, розділ викликав зацікавленість, з наукової точки зору насичений експериментальною частиною, а також безумовно важливими науковими висновками і має схвальну оцінку, а результати можуть бути використані при проектуванні сепараційного обладнання.

ІІІ. ЗАГАЛЬНІ ЗАУВАЖЕННЯ І ПОБАЖАННЯ

1. Неправильна термінологія: окружна швидкість (колова), підстановка вираження (виразу), в приватних похідних (частинних), відносна летючість (леткість), комплексно сполучені (комплексно спряжені).

2. Не зрозумілий вираз: «при цьому розрахунковий осередок, в який потрапила особливість, що виділялася, ділиться на 8 рівних осередків...» (с.198).

3. Яке відношення до розв'язуваної проблеми мають внутрішні пристрої та апарати, наведені на рис.1.3, 1.6.

4. На рис.1.15 наведено різні можливі схеми руху потоків у вертикальних та горизонтальних жалюзійних сепараційних секціях, але в роботі не проведено порівняння переваг та недоліків таких схем, а також відсутні пояснення, з яких причин в подальшому (розд.3,4,5,6) розглядаються процеси інерційно-фільтруючої сепарації лише у вертикальних криволінійних каналах.

5. Якщо, як зазначено автором (підрозд.1.2, 2.1), метод фізичної аналогії сепараційних та гідравлічних показників є обґрунтованим та адекватним для опису процесів інерційно-фільтруючої сепарації, то чим пояснюється той факт, що стрімке зростання ефективності сепарації відбувається при підвищенні швидкості руху суцільної фази від 4 до 10 м/с, а подальше підвищення швидкості призводить лише до зростання гідравлічного опору та несуттєво впливає на покращення ступеня розділення (рис.4.22, 4.26-4.32, 6.7-6.10).

6. На рис.2.2 проілюстровано процес цифрової програмної обробки мікрофотографій з зображенням дисперсних твердих часток з метою визначення їх розмірів, але ж в роботі розглядаються процеси сепарації газодисперсних систем типу газ-рідина, а не газ-тверді частки.

7. Рівняння (1.1) та (2.37) в лівій частині дублюють одне одного.

8. Багато математичних перетворень та одержання аналітичних рівнянь можна було б не робити. Для розв'язання вихідних рівнянь достатньо використати стандартні функції відомих пакетів Mathematics, MatLab та інших вузькоспеціальних пакетів? Адже при аналітичному підході ряд припущень, що спрощують процес аналітичного розв'язку зменшують ступінь точності одержаних наближених аналітичних розв'язків. Так, наприклад, для розв'язання рівнянь (3.1), (3.2). У зв'язку з цим виникає питання про збіжність степеневих рядів (3.3) і (3.12). Тобто обґрунтування збіжності відсутнє.

9. Степневий ряд (3.3) «обірвався» до квадратичних доданків (членів), чи не замало для одержання задовільної точності?

10. Слід більш чітко виділити, які саме моделі належать авторові, а які наведено з літературних джерел. Тобто, зрозуміло, існує ряд моделей з чітким посиланням на їх походження, а для деяких відсутні?

11. З формули(3.10) не зрозуміла величина V – відома чи та, яку треба знайти?

12. На с. 129, 130 в матриці (3.4) коефіцієнти F , C та інші є сталими величинами, разом з тим, у кінцевих перетвореннях на с. 130 вони стають функціями від кута φ , що вступає у протиріччя з початковими припущеннями.

13. Чим обґрунтовується низка спрощуючих припущень щодо розв'язку систем (3.1), (3.2) за допомогою модифікованого степеневого ряду? Це суттєво буде впливати на точність розв'язку моделі. Також при цьому відсутнє тестування (верифікація) розв'язку цієї моделі.

14. С. 142: що автор має на увазі під уявними розв'язками рівняння (3.39)?

15. Яке походження рівняння (3.140) ?

16. На с. 181 йдеться про теорему про «вирахування», можливо це (рос.) «теорема о вычетах»? Це вона, чи щось інше?

17. На с. 181 дельта функція Дірака першого роду, що це таке?

18. У формулах (4.7), (4.8), (4.9) не зрозуміло на командах (операторах) дій використання українських позначень операторів циклу розгалуження та ін. Тут повинні залишатись стандартні англійські ключові слова без перекладу: for; if та ін.

21. В чому полягає принципова відмінність сформульованих статистичних задач, що представлені у вигляді циклічних обчислень (4.8) та (4.9) з визначення розрахункового розподілу вловлених дисперсних часток (краплин рідини) на зовнішній стінці криволінійного сепараційного каналу?

19. У відповідності до схеми запропонованого на рис.6.5 інерційного тумановловлювача з подвійними проникними стінками та фільтруючим шаром між ними представляються цікавими дослідження умов їх обтікання в плані вивчення явища часткового проникнення газокраплинного потоку крізь металеву сітку та шар волокнистого фільтр-елементу, які чомусь не проведені автором;

23. При математичних моделюваннях стікання плівки сепарованої рідини по стінках сепараційних каналів розглядається одномірний рух рідини в плівці, хоча в дійсності він є просторовим (тривимірним).

IV. ВИСНОВКИ ОПОНЕНТА

Дисертаційна робота Ляпоценка Олександра Олександровича актуальна за темою, містить нові теоретичні і практичні результати, що системно вирішують поставлену важливу проблему наукового обґрунтування процесів інерційно-фільтруючої сепарації газодисперсних потоків та їх апаратного оформлення, використання яких може прискорити розвиток хімічної промисловості і нафтогазового комплексу України.

Автор чудово розуміється на математиці, вмів, як досвідчений фахівець, простежує і описує нові закономірності на основі аналізу фізичної сутності явищ процесів інерційно-фільтруючої сепарації, самостійно ставить і розв'язує наукові проблеми і втілює їх у нові технологічні та конструктивні рішення, що свідчить про його достатню наукову зрілість.

Науково обґрунтовані практичні рекомендації до проектування та інженерних методик розрахунку газодинамічних сепараторів та сформульовані в роботі наукові положення є принципово новими, логічно знайшли своє практичне втілення, що підтверджується актами впровадження у виробництво на машинобудівних заводах, підприємствах хімічної промисловості і нафтогазового комплексу України.

Результати роботи можуть бути використані при підготовці спеціалістів для хімічної, харчової та нафтогазової промисловості та підготовки відповідної навчальної літератури.

Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 70 українських та міжнародних наукових виданнях (у тому числі 3 статті у виданнях, що належать до науково-метричних баз даних Scopus та Web of Science), 15 патентах на корисну модель, 2 патентах України на винахід, 1 міжнародному патенті на винахід та 27 тезах доповідей на конференціях за матеріалами даної наукової роботи. Автореферат адекватно відображає зміст дисертації. Оформлення і зміст дисертації і автореферату відповідають вимогам щодо

дисертацій та їх авторефератів. Напрямок досліджень та їх зміст відповідають паспорту спеціальності 05.17.08 - процеси та обладнання хімічної технології.

В цілому вважаю, що дисертаційна робота “Теоретичні основи процесів інерційно-фільтруючої сепарації” є завершеною науковою працею, в якій на основі комплексних теоретичних та експериментальних досліджень газодинамічних сепарувальних систем розв’язано важливу науково-прикладну проблему створення наукових основ моделювання гідродинаміки і тепломасообміну інерційно-фільтруючих газосепараційних пристроїв для хімічної технології і, зокрема, є значним внеском у науково-технічний прогрес нафтогазової промисловості.

Робота відповідає вимогам п. 10 «Порядку присудження наукових ступенів» до докторських дисертацій, а її автор Ляпощенко Олександр Олександрович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.08 - процеси та обладнання хімічної технології.

Офіційний опонент
завідувач кафедри процесів
і апаратів харчових виробництв
Національного університету
харчових технологій,
д.т.н., професор

В.Л. Зав'ялов

