

## ВІДГУК

офіційного опонента — доктора технічних наук, професора  
Ульєва Леоніда Михайловича на дисертаційну роботу Ляпощенка  
Олександра Олександровича «ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ  
ІНЕРЦІЙНО-ФІЛЬТРУЮЧОЇ СЕПАРАЦІЇ», поданої на здобуття наукового  
ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та  
обладнання хімічної технології

**Актуальність теми** зумовлена тим, що процеси сепарації фаз є супутніми при протіканні більшості з основних процесів хімічної технології. Вловлювання цінних компонентів з газорідних потоків та зниження рівня забруднення газових викидів від краплинної рідини з високим вмістом шкідливих речовин можна досягти шляхом удосконалення існуючих і розроблення нових вискоелективних методів розділення газодисперсних неоднорідних систем та створення на їх основі удосконаленого сепараційного обладнання.

Одним із можливих шляхів удосконалення й підвищення ефективності сепараційного обладнання є поєднання переваг окремих способів організації руху та взаємодії двофазних потоків, створення теоретичних основ таких процесів, науково обґрунтованих методів розрахунку основних технологічних параметрів та характеристик відповідних сепараційних пристроїв. Так, в дисертаційній роботі запропоновано способи відмінні від традиційного послідовного розташування сепараційних пристроїв різного типу (грубе, середнє та тонке очищення) для підвищення ефективності сепарації в цілому. Розташуванням фільтруючих елементів в зонах потенційного вторинного унесення бризок з інерційних сепараційних каналів досягається зниження енергетичних витрат на процес розділення та підвищення ступеня розділення у широких діапазонах навантажень та співвідношення фаз за рахунок уникнення негативного впливу при протіканні вторинних процесів поряд з основним процесом сепарації.

Саме тому, можна стверджувати, що дана дисертаційна робота є актуальною та своєчасною, так як вирішує важливу науково-прикладну проблему хімічної технології, а саме створення теоретичних основ процесів інерційно-

фільтруючої сепарації та науково обґрунтованих методів розрахунку сепараційного обладнання.

### **Зв'язок з державними чи галузевими програмами, пріоритетними напрямками науки й техніки**

Дисертаційна робота відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки й техніки на період до 2020 року (Закон України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», ст.3, п.1,3,4), науковим напрямкам кафедри процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв Сумського державного університету (СумДУ) та виконувалась згідно з планом держбюджетних НДР СумДУ на 2007-2019 рр. за темами «Дослідження вихрових грануляційних та масотеплообмінних пристроїв», «Дослідження гідродинамічних та масотеплообмінних характеристик пристроїв з вихровими та високотурбулізованими одно- та двофазними потоками», «Гідродинамічні показники двофазних потоків тепломасообмінного, грануляційного та сепараційного обладнання» та «Багатовимірні системи управління технічними і технологічними об'єктами» (МОН України, ДР №0106U013012, №0110U002632, №0115U002551, №0113U004134).

### **Наукова новизна дисертаційних досліджень**

Дисертаційна робота є узагальненням наукових досліджень та розробок автора, містить наукові положення та науково обґрунтовані результати у галузі процесів та обладнання хімічної технології, що розв'язують важливу науково-прикладну проблему, яка полягає в розробці теоретичних основ процесів інерційно-фільтруючої сепарації і має важливе народногосподарське значення, а також представляє перспективи використання та запровадження у технологіях розділення газодисперсних систем. Наукова новизна проведених дисертаційних досліджень з розробки теоретичних основ процесів інерційно-фільтруючої сепарації газодисперсних потоків, моделювання гідродинаміки інерційно-фільтруючих газосепараційних пристроїв є безперечною і полягає в наступному:

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

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

3) розвинуто науковий підхід до фізичного моделювання та теоретичних досліджень гідродинамічних процесів при інерційно-фільтруючій сепарації газорідних систем, розробки методів розв'язання основних рівнянь гідродинаміки та математичного моделювання гідродинамічних процесів при інерційно-фільтруючій сепарації;

4) вперше отримано 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;

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

6) вперше визначено основні гідродинамічні характеристики сепараційних елементів інерційно-фільтруючих сепараторів за результатами

експериментальних досліджень модельних зразків криволінійних сепараційних каналів;

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

8) науково розвинуто методику розрахунку газодинамічних сепараторів з метою підвищення ефективності сепарації та зниженням гідравлічного опору з визначенням оптимальних конструктивних параметрів інерційно-фільтруючих сепараційних елементів (довжина, ширина та висота каналів, радіус і кількість гофр, товщина шару фільтру, висота розташування переливних жолобів та інші).

### **Наукова та практична цінність роботи**

Дисертаційна робота безсумнівно представляє наукову цінність, яка полягає в розширенні знань про механізми сепарації газодисперсних систем, гідродинаміку газодисперсних потоків в інерційно-фільтруючих сепараційних пристроях. Здобувачем запропоновано окремий клас нових, захищених патентами, способів сепарації та нових конструкцій інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв. Впроваджено сучасні методи визначення дисперсного складу газодисперсних сумішей та суспензій. Розроблені наукові положення та практичні рекомендації використано при підготовці розділів навчальних посібників «Технологічні основи нафто- та газопереробки», «Обладнання газо- та нафтопереробних виробництв» з описом методів аналізу складу багатокомпонентних систем; технологічних основ процесів і апаратів для розділення емульсій, суспензій та газоконденсатних систем; контактних сепараційних та тепломасообмінних пристроїв. Результати досліджень використано науковцями кафедри комп'ютерних наук СумДУ при виконанні НДР «Багатовимірні системи управління технічними і технологічними об'єктами» (ДР №0113U004134). Розроблено програму та методику дослідно-промислових випробувань нових інерційно-фільтруючих газосепараторів, крапле- та

тумановловлювачів для блоків сепараційних установок (для ПАТ «Укрнафта»), а також науково обґрунтовані практичні рекомендації та інженерні методики для їх розрахунку і проектування. Отримані наукові результати та практичні рекомендації впроваджені у виробництво на машинобудівних заводах, підприємствах хімічної промисловості і нафтогазового комплексу України та іноземних держав (ПАТ «Сумське НВО ім.М.В.Фрунзе», АТ «Сумський завод «Насосенергомаш», холдинг «Група ГМС», Група «Лукойл», концерн «Укрросметал», ПАТ «Укрхімпроект», ТОВ «Агросервіс», ТОВ «Сумифітоформація», ПрАТ «Укргазвидобуток», Представництво «Регал Петролеум Корпорейшн Лімітед» та інші).

**Особистий внесок автора** полягає в аналізі стану проблеми, обґрунтуванні і розробленні основної ідеї і теми дисертації, розробленні наукових положень, програм та методик експериментальних досліджень і дослідно-промислових випробувань, узагальненні отриманих результатів і формулюванні висновків, розробці науково обґрунтованих практичних рекомендацій та інженерних методик розрахунку, впровадженні науково-технічних розробок.

**Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій** підтверджується великим обсягом матеріалів, зібраних в ході проведення наукових експериментів, які ретельно узагальнено та логічно проаналізовано. Достовірність отриманих результатів визначається сучасними методами досліджень та аналізу, які застосовувались автором, а також нерозходженням основних положень та теоретичних висновків дисертації з фундаментальними положеннями механіки рідини та газу, механіки аеродисперсних систем, міграційної теорії процесів турбулентного перенесення та осадження дисперсних часток з турбулентного потоку, а також класичними положеннями теорії гідродинаміки та тепломасообміну.

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на 45 міжнародних наукових конференціях, конгресах, симпозіумах, школах-семінарах

(2006-2016 рр.), а запропоновані розробки сепараційного обладнання отримали високу оцінку на виставках наукових розробок.

**Повнота опублікування основних результатів дисертації в наукових фахових виданнях та автореферат.** Результати дисертаційної роботи опубліковано у 70 наукових працях, з них 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. Обсяг і зміст опублікованих праць повністю охоплює всі розділи дисертації, в достатній мірі відображає її зміст, а особистий внесок здобувача в опублікованих у співавторстві роботах є визначальним.

Вимоги МОН України щодо опублікування результатів дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук повністю дотримані, а в публікаціях наведено обґрунтування отриманих наукових результатів відповідно до мети і задач досліджень, висвітлено основні наукові положення, висновки й рекомендації. Інформація про отримані результати у кандидатській дисертації «Гідродинаміка інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв очищення природного газу» наведена лише в оглядовій частині докторської дисертації здобувача.

Зміст автореферату ідентичний до основних положень дисертації, а обсяг відповідає встановленим нормам.

**Оформлення дисертації** відповідає вимогам ДСТУ 3008-95 «Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення» та вимогам ДАК МОН України, висвітленими у Бюлетені ВАК України за №2 2000 року та у Бюлетені ВАК за №9-10 2011 року.

## **Аналіз змісту дисертаційної роботи**

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

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

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

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

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

На етапі застосування диференціальних методів математичного аналізу та інтегральних обчислень, використано CAS-системи комп'ютерної алгебри. Для математичного імітаційного моделювання гідродинамічних процесів при інерційно-фільтруючій сепарації пропонується застосування CFD-методів та програмних пакетів з обчислювальної гідродинаміки.

На етапі експериментальних досліджень гідродинамічних процесів при інерційно-фільтруючій сепарації застосовано традиційно відомі методи експериментальної гідродинаміки у сукупності з методами прямого спостереження та цифрової програмної обробки отриманих матеріалів. Експериментальні дослідження проведено у відповідності до оригінальних методик визначення гідродинамічних характеристик шляхом фізичних моделювань стендових моделей криволінійних сепараційних каналів, інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв, а також масштабних моделей інерційно-фільтруючих сепараторів.

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

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

Розроблено фізичну модель руху газокраплинних потоків по сепараційних каналах та фільтруючих секціях інерційно-фільтруючих газосепараторів

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

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

Розвинуто модель інерційно-фільтруючої сепарації, що враховує утворення та конденсаційне зростання краплин в турбулентному потоці газорідинної суміші, вплив фазових перетворень та коалесценції краплин конденсату на ефективність процесів інерційно-фільтруючої сепарації з конденсацією за рахунок додаткового охолодження стінок криволінійних сепараційних каналів, що надає можливість вловлювання вологи навіть у вигляді конденсаційного туману. На етапі моделювання процесів міжфазного тепломасообміну при інерційно-фільтруючій сепарації з конденсацією в криволінійних інерційно-фільтруючих сепараційних каналах здійснено спробу вирішення сполученої задачі теплообміну. При цьому застосовано підхід, який дозволяє звести систему диференціальних рівнянь гідродинаміки (рівнянь Нав'є-Стокса) та конвективного теплообміну (рівнянь Фур'є-Кірхгофа) в приватних похідних до двох незв'язаних крайових задач.

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

Визначено умови реалізації процесів інерційно-фільтруючої сепарації високодисперсної краплинної рідини, запропоновано окремий клас нових

способів сепарації та нових конструкцій інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв, які захищено 18 патентами, а їх дослідно-промислові зразки впроваджені у виробництво та за основними технічними характеристиками не поступаються кращим відомим у світі аналогам.

Використовуючи результати теоретичних і експериментальних досліджень та у відповідності до обраної стратегії оптимізаційних моделювань розроблено науково обґрунтовані практичні рекомендації, методики та алгоритми до комп'ютерно-інтегрованих технологій проектування і автоматизованих розрахунків інерційно-фільтруючого сепараційного обладнання для блоків сепараційних установок, статичного та динамічного оптимізаційного моделювання з метою підвищення ефективності процесів сепарації та зниження гідравлічного опору сепараційного обладнання з визначенням оптимальних конструктивних параметрів та компонування інерційно-фільтруючих сепараційних вузлів в корпусах комбінованих апаратів.

**У висновках** до окремих розділів та загальних висновках до дисертаційної роботи викладаються здобуті у дисертації найбільш важливі наукові та практичні результати, які сприяли розв'язанню наукової проблеми з зазначенням кількісних показників одержаних результатів, обґрунтуванням достовірності результатів, формулюванням рекомендацій щодо наукового та практичного використання одержаних результатів.

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

**Зауваження щодо змісту і оформлення дисертації та автореферату, завершеності дисертації в цілому:**

1. В огляді не згадуються фільтри-сепаратори.
2. Не згадується актуальна сучасна іноземна література з підготовки природного газу, немає посилань на керівництво GPSA.
3. Завищена ефективність запропонованих сепараційних елементів.
4. Наводиться словесна форма прийнятих допущень при вирішенні рівнянь плинугазу та руху частинок в каналах. Доцільніше їх було б отримати для конкретних геометричних діапазонів параметрів каналів і технологічних параметрів процесу.
5. Не обґрунтовано використання фільтрувальних накладок всередині вигинів жалюзі.
6. Викликає сумнів адекватність обраного методу розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса у вигляді квадратичної залежності або за допомогою спрощеного двовимірного методу Фробениуса. Існує безліч поліноміальних методів, які добре зарекомендували себе при рішенні рівнянь в приватних похідних, наприклад, методи Виладсена-Финлайсена, методи ортогональних многочленів і т. п.
7. Аналіз розподілу швидкостей на рисунках 3.4–3.6 не дає можливості зробити висновок про вихроутворення в пристінковій області, тому що немає від'ємних значень окружної швидкості на розподілі.
8. Не пояснено, за рахунок чого без перепаду тиску рідина стікатиме з фільтрувальних накладок, а не буде накопичуватися у волокнах.
9. При забиванні фільтрувальних накладок механічними домішками жалюзі будуть вимагати заміни. Як часто?
10. При визначенні сил, які діють на краплю, зроблені зайві спрощення (стор. 140), з яких випливає що представлена теорія працює лише при відношенні густин рідини до газу більше 100. Це обмежує робочий тиск сепарації природного газу значенням 0,6 МПа, а для середовищ повітря/вода – 1,0 МПа.

11. Не пояснено на стор. 164 за рахунок чого фільтруючі накладки будуть працювати в режимі самоочищення.
12. Використання коливань стінок жалюзі для виборчої сепарації і навіть класифікації (стор. 180–182) при таких значних спрощеннях моделі руху краплі рідини має суто академічний інтерес і є штучним, і таким, який не буде реалізовано.
13. При вирішенні задачі конвективного теплообміну в плівці рідини яка стікає п. 5.2.2. не враховано вплив утворення поверхневих хвиль на плівці. Це можна було б зробити за допомогою коригувального множника Зозулі.
14. Загальне зауваження до математичних моделей та їх вирішення. Їх представлення не дає можливості узагальнення результатів дисертації. Варто було б привести моделі і рішення в безрозмірному вигляді. Ймовірно тому немає порівнянь з результатами інших авторів.

Проте, не зважаючи на вказані зауваження та недоліки, робота не втрачає своєї повноти та значимості. Наведені зауваження не зменшують наукової цінності досліджень та значимості роботи в цілому. Слід також зазначити, що вказані зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Ляпоценка О.О., а є лише дорадчими, дискусійними чи технічними.

#### **Загальний висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам**

Дисертаційна робота Ляпоценка О.О. «Теоретичні основи процесів інерційно-фільтруючої сепарації» є завершеним науковим дослідженням, виконаним на актуальну тему, в якій отримані нові науково-обґрунтовані результати в галузі процесів та обладнання хімічної технології, що в сукупності вирішують важливу науково-прикладну проблему, сутність якої полягає в створенні теоретичних основ процесів інерційно-фільтруючої сепарації.

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології.

За актуальністю, науковою новизною, практичною значущістю та сформульованими науковими положеннями дисертаційна робота Ляпоценка О.О. «Теоретичні основи процесів інерційно-фільтруючої сепарації» виконана на рівні вимог до докторських дисертацій у відповідності з п.9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р., а її автор, Ляпоценко Олександр Олександрович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології.

Офіційний опонент, професор кафедри інтегрованих технологій, процесів і апаратів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» доктор технічних наук, професор

Л.М.Ульєв

Підпис *Ляпоценка О.О.*

**ЗАСВІДЧУЮ:**  
**ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР**  
**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**  
**"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

*Л.М. Ульєв* ЗАЙЦЕВ Ю.І.  
 " " " 20 16 р.