

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**ПАВЛЕНКА ІВАНА ВОЛОДИМИРОВИЧА**

**«Науково-теоретичні основи вібраційних процесів у гетерогенних системах»,**

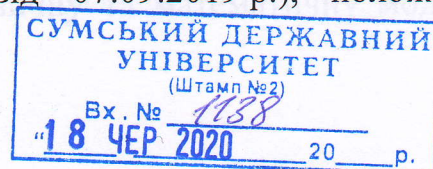
**представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук**

**за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології**

Актуальність теми дисертаційної роботи, її зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Проектування апаратів хімічної технології, зокрема пристроїв розділення газокраплинних потоків, класифікації механічних сумішей, фільтраційного та грануляційного обладнання передбачають дослідження та визначення гідродинамічних характеристик потоків. При цьому, підвищуючи інтенсивність основних гідродинамічних і тепломасообмінних процесів за рахунок накладання вібраційного впливу, слід ураховувати, що на ефективність технологічного обладнання впливають і вторинні процеси, що відбуваються на нерозрахункових режимах роботи обладнання або на виході з апарата. Водночас існуючі математичні моделі, що опираються переважно на критеріальні рівняння, не дозволяють визначати залежність між характеристиками процесу і параметрами вібраційного впливу.

Виходячи з вище сказаного дисертаційна робота Павленка Івана Володимировича, спрямована на розроблення науково-теоретичних основ вібраційних процесів у гетерогенних системах, певною мірою заповнює зазначений пробіл знань, має наукову новизну та практичну значущість для удосконалення існуючих і створення нових, вискоефективних вібраційних технологій хімічної промисловості і її наукова та практична актуальність не викликає сумнівів.

Актуальність теми дисертаційного дослідження у достатній мірі обґрунтована дисертантом у роботі й авторефераті та підтверджується тим, що дисертаційна робота виконана відповідно до «Переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року» (Постанова Кабінету Міністрів України № 942 від 07.09.2019 р.), положень



«Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010–2020 рр.» (Постанова Кабінету Міністрів України № 243 від 01.03.2010 р.), пп. 1, 3, 6 ст. 3 Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» і «Стратегічних пріоритетних напрямів інноваційної діяльності в Україні на період 2011–2021 рр.».

В основу роботи покладено результати науково-дослідних робіт, які виконувались у Сумському державному університеті, в яких автор брав участь як виконавець: «Гідродинамічні показники двофазних потоків тепломасообмінного, грануляційного та сепараційного обладнання» (ДР № 0115U002551); «Розробка та впровадження енергоефективних модульних сепараційних пристроїв для нафтогазового та очисного обладнання» (ДР № 0117U003931); «Створення нових гранульованих матеріалів для ядерного палива та каталізаторів в активному гідродинамічному середовищі» (ДР № 0120U102036).

**Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі, базуються на значному обсязі теоретичних та експериментальних досліджень, є логічно обґрунтованими та підтверджуються результатами натурних експериментів і математичного моделювання. Достовірність результатів підтверджується використанням сучасної вимірювальної та комп'ютерної техніки й відтворюваністю експериментальних даних.

**Наукова новизна роботи.** У дисертації запропоновано та обґрунтовано нові наукові положення, висновки та рекомендації, які дозволяють підвищити ефективність апаратів хімічної технології за рахунок інтенсифікації робочих процесів, зокрема у сепараційних, фільтраційних, пневмокласифікаційних і віброгрануляційних пристроях шляхом розроблення науково-теоретичних основ дослідження механізмів вібраційного впливу на гетерогенні системи.

Одержані в роботі нові наукові результати є такими:

– *уперше* створено науково-теоретичні основи процесу вібраційної сепарації газодисперсного потоку, що дозволило уточнити фізичну та математичну моделі

руху частинок дисперсної фази, визначити їх кінематичні характеристики та встановити параметри, що визначають особливості руху краплинної рідини в сепараційному каналі, а також підтвердити можливість застосування процесів віброкоагуляції та вибіркової сепарації краплинної рідини з газодисперсного потоку;

– *уперше* створено науково-теоретичні основи дослідження процесу стікання плівки вловленої рідини в сепараційному каналі з урахуванням конвективного теплообміну на охолоджуваних поверхнях і взаємодії з потоком суцільної фази;

– *уперше* розроблено математичну модель вторинного подрібнення краплинної рідини під дією сил різної природи, що дозволило встановити аналітичні вирази для граничних розмірів крапель залежно від частоти вібраційного впливу;

– *удосконалено* математичну модель нестационарного капілярного підйому рідини, що має важливе значення при дослідженні робочих процесів в інерційно-фільтруючих сепараторах і апаратах випарного охолодження;

– *удосконалено* математичну модель визначення сумарної площі поверхні розділення фаз у процесах хімічної технології, що враховує імовірнісний розподіл частинок дисперсної фази за їх розмірами;

– *дістали подальшого розвитку* методи наукових досліджень процесів пневматичної класифікації механічних сумішей, розпилення рідини з поверхнево-активними полімерними домішками та вивільнення поживних речовин із капсульованих добрив з органо-мінеральним покриттям.

**Оцінка висновків здобувача щодо значущості його роботи для науки і практики.** Одержані дисертантом результати мають важливе значення для науки, оскільки вони сприяють розвитку енергоефективних вібраційних технологій для хімічної промисловості, що реалізуються в апаратах для розділення та пневмокласифікації газодисперсних систем і вібраційної грануляції плавів.

**Практична значимість результатів роботи.** Сформульовані теоретичні й методологічні положення та виявлені на їх основі механізми вібраційного впливу на гетерогенні системи дозволили розробити узагальнену методику визначення ефективності гідромеханічних і тепломасообмінних процесів, що ґрунтується на комплексному застосуванні регресійного аналізу та засобів штучного інтелекту.

Дисертантом запропоновано модульний підхід у проектуванні сепараційного обладнання, до переваг якого у процесі проектування багатofункціональних сепараторів із динамічно-регульованими пристроями можна віднести поєднання в одному модулі декількох технологічних процесів і зменшення масогабаритних характеристик, що також спрощує процес розроблення і виготовлення, а також впровадження автоматизованих систем управління, підвищуючи ефективність технологічного процесу.

**Завершеність дисертації в цілому.** Слід зазначити, що дисертація Павленка І. В. є завершеною науковою роботою, що складається з анотації, вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи складає 476 сторінок.

У *вступі* (стор 33–42) обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання досліджень, визначено наукову новизну й практичну цінність одержаних результатів, детально розкрито особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертації, структуру та обсяг роботи.

У *першому розділі* (стор. 43–96) здобувачем шляхом критичного аналізу результатів наукових досліджень з питань вивчення механізмів вібраційного впливу на багатофазні середовища встановлено перелік раніше не вирішених наукових проблем, пов'язаних із дослідженням вібраційного впливу на гетерогенні системи в гідромеханічних і тепломасообмінних процесах при сепарації газокраплинних потоків, фільтруванні, вібраційної грануляції плавів та пневматичної класифікації газодисперсних систем.

*Другий розділ* дисертаційної роботи (стор. 97–148) присвячено методології проведення наукового дослідження. Автором 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.

Для підтвердження достовірності отриманих результатів запропоновано використання методів оцінювання параметрів за результатами експериментальних досліджень із комплексним застосуванням регресійного аналізу та штучних

нейронних мереж.

У *третьому розділі* (стор. 149–226) Павленком І. В. викладено науково-теоретичні основи вібраційних процесів сепарації газодисперсних систем. Зокрема, досліджено гідродинамічні особливості руху суцільної та дисперсної фаз у сепараційному каналі за умов накладання вібраційного впливу. У результаті встановлено кінематичні характеристики міграції краплинної рідини та обґрунтовано геометричні характеристики зливних жолобів.

Дослідження впливу сили Бассе на газокраплинний потік за умов накладання коливань дозволить теоретично обґрунтувати застосування явища вибіркової сепарації багатокомпонентних гетерогенних систем. Також доведено, що інтенсифікація процесу сепарації газодисперсних потоків може бути реалізована за рахунок використання ефекту вібраційного зважування. У результаті моделювання одержано аналітичні вирази для діаметра частинок дисперсної фази та їх розподілу за висотою розміщення віброзваженого шару.

Досліджено закономірності нестационарного капілярного руху рідини у фільтрувальних елементах сепараційних пристроїв та апаратах випарного охолодження, у результаті чого створено уточнену математичну модель нестационарного процесу капілярного підйому рідини та сформульовані науково-теоретичні основи теорії ґратчастих структур, що має важливе значення для інтенсифікації процесів хімічної технології.

У *четвертому розділі* (стор. 227–256) автором розроблено науково-теоретичні основи моделювання та комплексні математичні моделі вібраційних процесів грануляції. Встановлено умови одержання гранул монодисперсного складу. Вирішальним параметром, що визначає монодисперсність краплинного середовища визначено частотний параметр вібраційного впливу, що впливає на особливості розподілу радіальної швидкості всередині краплі. Розрахунки за отриманими моделями дозволяють обґрунтувати існування різних режимів диспергування краплинної рідини.

Здобувачем також розроблено науково-методологічні рекомендації щодо вибору механізму передачі енергії до елементів грануляційного обладнання. У результаті доведено ефективність використання клино-пасової передачі як привода

обертового віброгранулятора, розробленого у науково-дослідній лабораторії грануляційного і масообмінного обладнання Сумського державного університету. Також розроблено математичну модель передачі енергії від механічного збудника коливань до плаву рідини, що дозволило створити науково-теоретичні основи оцінювання параметрів процесу вібраційної грануляції із забезпеченням вібраційної надійності механічної системи.

У *п'ятому розділі* (стор. 257–298) дисертантом викладено наукові основи супутніх процесів при сепарації гетерогенних систем. Зокрема, для запобігання явищу вторинного винесення краплинної рідини з сепараційного каналу створено науково-теоретичні основи дослідження процесу стікання плівки вловленої рідини при її взаємодії з газокраплинним потоком з урахуванням конвективного теплообміну на охолоджуваних поверхнях.

Шляхом урахування функції розподілу розмірів дисперсних частинок розроблено уточнену математичну модель для визначення поверхні контакту фаз у процесах хімічної технології.

Проведені дослідження механізмів вібраційного впливу на краплинне середовище при віброгрануляції дозволили аналітично визначити числове значення критичного числа Вебера для вторинного подрібнення крапель, а також встановити критерій існування різних режимів диспергування краплинної рідини.

*Шостий розділ* (стор. 299–320) присвячено інтеграції науково-теоретичних основ із теоріями нестационарних гідромеханічних і тепломасообмінних процесів хімічної технології. Розроблено математичну модель процесу пневмокласифікації газодисперсних систем, у результаті реалізації якої встановлено векторні поля швидкостей суцільної та дисперсної фаз. Запропоновано регресійні залежності для визначення періоду завантаження сипкого матеріалу. Також встановлено аналітичний вираз для півперіоду вивільнення азоту з капсульованих добрив з органомінеральним покриттям.

У *сьомому розділі* (стор. 321–338) наведено області практичної реалізації результатів дисертаційного дослідження. Запропоновано і захищено патентами України окремий клас нових способів і пристроїв розділення газодисперсних

систем, що дозволяють досягти високого значення ефективності розділення в широкому діапазоні зміни швидкості багатофазного потоку.

Для імплементації запропонованого модульного підходу під час конструювання, виготовлення деталей і складання вузлів розроблено методику класифікації сепараційного обладнання за конструкторсько-технологічними ознаками та конструкторсько-технологічну класифікацію уніфікованих модулів сепараційних пристроїв.

*Висновки* (стор. 339–343) детально та в логічній послідовності відображають хід вирішення поставлених у роботі завдань та містять основні результати дисертаційного дослідження, що в повній мірі характеризують науково-практичні досягнення дисертанта.

*Список використаних джерел* (стор. 344–404) містить 616 найменувань вітчизняних та зарубіжних наукових джерел за темою дисертаційної роботи та у достатній мірі відображає інформацію за темою дослідження, що виконував здобувач.

**Оформлення дисертації** за структурою, мовою та стилем викладення відповідає усім вимогам до оформлення дисертацій, затвердженим Міністерством освіти і науки України (Наказ № 40 від 12.11.2017 р.). Мова та стиль викладення дисертації й автореферату чітко висвітлюють отримані науково-практичні результати, що визначені метою та завданнями досліджень.

**Повнота викладення результатів дисертації в наукових фахових виданнях.** Основні положення і результати дисертаційного дослідження викладені у 45 наукових працях, з яких: 2 монографії; 24 статті, зокрема 7 статей у наукових фахових виданнях з переліку МОН України, 17 статей у виданнях, що індексуються БД Scopus та/або Web of Science Core Collection; 14 публікацій у працях міжнародних конференцій; 3 патенти України на корисну модель; 2 авторські свідоцтва.

Наведений у публікаціях матеріал повною мірою відображає основні результати та обґрунтовує наукові положення дисертаційної роботи.

**Апробація результатів дисертаційного дослідження.** Потрібно відзначити достатність оприлюднення основних результатів. Матеріали дисертації доповідались та обговорювались на 14 конференціях міжнародного рівня.

**Шляхи використання наукових і практичних результатів роботи і ступінь їх реалізації.** Результати роботи стосовно науково-практичних основ розроблення нових і удосконалення існуючих технологій промислового видобутку, підготовки до транспортування та переробки нафти й газу впроваджені у виробничу діяльність ТОВ «Пром-Енерго Продукт» (акт впровадження від 15.11.2019 р.).

Теоретичні та практичні розробки використано під час підготовки монографій «Методи ідентифікації параметрів математичних моделей коливальних процесів», «Dynamic Analysis of Centrifugal Machines Rotors with Combined Using 3D and 2D Finite Element Models» та підручника «Hydroaeroelasticity».

Одержані наукові результати та практичні рекомендації впроваджені у навчальному процесі Сумського державного університету при реалізації програми підвищення кваліфікації для керівного складу й провідних фахівців з нафтогазових технологій ПрАТ «Укргазвидобуток», ПрАТ «Смарт-Холдинг», ТОВ «Пром-Енерго Продукт» та групи «Smart Energy» (акт впровадження від 12.12.2019 р.), а також при підготовці здобувачів вищої освіти до участі у Всеукраїнських конкурсах студентських наукових робіт у галузі «Нафтова та газова промисловість» (акт впровадження від 21.12.2015 р.).

**Ідентичність змісту автореферату основним положенням дисертаційної роботи.** Зміст автореферату повністю відповідає розділам дисертації та її основним положенням. Дисертація є одноосібно написаною кваліфікаційною науковою працею, що містить сукупність результатів та наукових положень, поданих автором для публічного захисту, має внутрішню єдність і свідчить про особистий внесок автора в науку.

**Зв'язок докторської дисертації з кандидатською.** Список публікацій автора, наукових положень, результатів та висновків, які захищені здобувачем у кандидатській дисертації, не залучені до розгляду та не стали предметом дослідження поданої до захисту докторської дисертації.

#### **Зауваження та дискусійні питання до автореферату та дисертації**

Поряд із загальною позитивною оцінкою дисертаційної роботи необхідно відзначити наявність у ній окремих дискусійних питань та зауважень, які потребують додаткової аргументації:



1. В дисертації бажано навести порівняння результатів розрахунків за отриманими формулами з експериментальними даними або з відомими програмними комплексами які використовувались в роботі.
2. В деяких формулах, отриманих автором (розділ 3-4), явно не вказано для якої області значень можливе їх застосування.
3. В розділі 3.1.2 – 3.1.3 розглянуті ламінарний та турбулентний режим руху. Не зрозуміло як враховувався в роботі перехідний режим, адже окремі частинки, що рухаються в потоці мають різну швидкість.
4. В розділі 3 обґрунтовано застосування явища вібраційної коагуляції з можливістю інтенсифікації процесу. Відомо, що вказане призводить до зміни розміру, можливо форми частинок. Не визначено як дане явище впливає на потік. Також бажано розглянути і механізм коагуляції.
5. З тексту не зрозуміло чи враховувався ефект коагуляції при моделюванні руху частинок.
6. При моделюванні процесу стікання плівки (розділ 5.1.1) з вказаних граничних умов не зрозуміло як враховується взаємодія зі стінкою, тільки  $W|_{y=0} = 0$ . Як в цьому випадку враховується ефект прилипання рідини, ковзання відносно стінки, її шорсткість.
7. Як пояснюється спрощення виразу (5.29) до (5.30) при математичному моделюванні конвективного теплообміну (розділ 5.1.2).
8. В розділі 6.1.1 при моделюванні руху твердої частинки у газодисперсному потоці, з застосуванням числових моделей, використовуються відносно спрощені формули, які не враховують зіткнення частинок зі стінками. Для поширення можливостей їх використання бажано враховувати потрапляння матеріалу на перешкоди, стінку.
9. Для деяких математичних моделей, отриманих автором, не вказана можливість їх застосування для конкретних апаратів. Таке пояснення безперечно становило б особливу цінність для практиків.

10. У дисертаційній роботі розглянуто та запропоновано перспективні технічні рішення для інтенсифікації технологічних процесів та підвищення ефективності, але для деяких на наведені прямі дослідження впливу вказаних способів.
11. З тексту автореферату не зрозуміло де використовуються системи ANSYS та «Particle Image Velocimetry» на використання яких є посилання в методах досліджень, хоча ці дані приведені в дисертації.
12. Не зрозуміле посилання на 27 сторінці автореферату на рис.23.

Вказані вище зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертації та її високої якості в цілому. В роботі сформульовані нові наукові пропозиції, сукупність яких можна кваліфікувати як теоретичне узагальнення та новітнє рішення важливої науково-прикладної проблеми, яка спрямована на дослідження процесів хімічної технології, зокрема вібраційних процесів сепарації газокраплинних систем і віброгрануляції плавів, а також гідромеханічних процесів фільтрації та пневмокласифікації.


### **ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК**

Аналіз дисертації, автореферату та опублікованих праць Павленка Івана Володимировича дає підстави зробити висновок про те, що робота «Науково-теоретичні основи вібраційних процесів у гетерогенних системах» є актуальним, завершеним, цілісним і самостійним науковим дослідженням, яке містить наукову новизну та має теоретичне й практичне значення. У роботі отримано нові науково обґрунтовані результати у формі теоретико-методологічних положень і практичних рекомендацій, що отримані на основі достовірної та всебічної оцінки фізичних явищ які впливають на роботу сепараційних пристроїв. Вказане дозволяє виконувати теоретичні дослідження та приймати обґрунтовані наукові та технічні рішення які за рахунок інтенсифікації робочих процесів забезпечать розробку та впровадження енергоефективних вібраційних технологій для хімічної промисловості, що реалізуються в апаратах для розділення та пневмокласифікації газодисперсних систем і вібраційної грануляції плавів.

Вважаю, що за науковим рівнем та науково-прикладними результатами дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів п. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології, а здобувач Павленко Іван Володимирович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за вказаною спеціальністю.

Офіційний опонент:

професор кафедри хімічного, полімерного  
і силікатного машинобудування  
КПІ ім. Ігоря Сікорського,  
доктор технічних наук, доцент

  
15.06.2020р

В.Ю. Щербина

Підпис Щербини В.Ю. засвідчую:

Вчений секретар КПІ ім. Ігоря Сікорського



В.В. Холявко