

## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

Гумницького Ярослава Михайловича

на дисертаційну роботу **Остроги Руслана Олексійовича**

**«Теоретичні основи процесів формування гранул у неоднорідному середовищі»,**

представлену для 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.** Виробництво гранульованих продуктів залишається одним із ключових напрямів сучасної індустрії, оскільки процеси гранулювання знаходять широке застосування у багатьох галузях: від сільського господарства і виробництва мінеральних добрив до фармацевтики та харчової промисловості. На сьогодні, основні методи отримання гранул включають приплювання, обкочування та нарощування в умовах псевдозріджених і зважених шарів. Якщо такі методи, як отримання однорідних гранул у грануляційних баштах і барабанних грануляторах, вже добре вивчені та активно використовуються в промисловості, то методи гранулювання в тарілчастих грануляторах і апаратах з активними гідродинамічними потоками ще не отримали належного впровадження у виробничу практику. Це зумовлено недостатнім рівнем вивчення науково-теоретичних основ формування гранул саме у неоднорідних середовищах.

Зокрема, важливо дослідити закономірності формування гранул у киплячих і зважених шарах, особливо при створенні пористих і багатошарових гранул. Нестача досліджень у цьому напрямі стримує розвиток сучасних технологій гранулювання та їх впровадження у виробництво. Тому розвиток технологічних процесів, пов'язаних із виробництвом гранульованих продуктів, повинен бути спрямований на вдосконалення конструкційного оформлення обладнання для грануляції, оптимізацію технологічних параметрів процесу з метою підвищення його ефективності та зменшення енергетичних витрат. Це включає як теоретичні дослідження розподілу рідини та твердих частинок у неоднорідних середовищах, так і розробку практичних рішень для промислового використання, що дозволить підвищити якість та конкурентоспроможність гранульованих продуктів на ринку.

Дисертаційна робота Остроги Руслана Олексійовича спрямована на розроблення наукових засад формування гранул у неоднорідному середовищі, що як раз і є передумовою для отримання гранульованих продуктів для різних галузей промисловості.

Актуальність обраної теми підтверджується тим, що тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетним напрямам розвитку провідних країн Європейського Союзу і отримала підтримку Horizon Europe за грантовою угодою № 871072 «Monodisperse systems in the production of foodstuff and compound (combined) fertilizers», та здійснювалась відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри хімічної інженерії Сумського державного університету, пов'язаних із тематиками «Гідродинамічні показники двофазних потоків тепломасообмінного, грануляційного та сепараційного обладнання» (номер





державної реєстрації 0115U002551, термін виконання 2015–2019 рр.), «Small-scale energy-saving modules with the use of multifunctional devices with intensive hydrodynamics for the production, modification and encapsulation of granules» (номер державної реєстрації 0119U100834, термін виконання 2019–2021 рр.), «Створення нових гранульованих матеріалів для ядерного палива та каталізаторів в активному гідродинамічному середовищі» (номер державної реєстрації 0120U102036, термін виконання 2020–2022 рр.), «Виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Технічні науки» Сумського державного університету» – етап 3 (номер державної реєстрації 0121U112684, термін виконання 2023 р.). У дисертаційній роботі використані результати досліджень, проведених під час виконання госпдогвірних науково-дослідних робіт за темами «Наукове обґрунтування вибору оптимального апаратурного оформлення малогабаритної мобільної установки капсулювання мінеральних добрив» (№ 51.18-01.17.СП), «Напрацювання дослідних зразків гранульованих добрив на органічній основі» (№ 51.18-2022.СП/01), «Напрацювання дослідних зразків складнозмішаних (комбінованих) добрив спеціального призначення» (№51.18-2023.СП/03), у яких здобувач був керівником.

**Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** Наукові положення, висновки та рекомендації, що сформульовані в дисертаційній роботі, ґрунтуються на опрацюванні значного обсягу теоретичних та експериментальних досліджень, є логічно обґрунтованими і підтверджуються рекомендаціями до використання у виробництві. Достовірність результатів підтверджується також використанням сучасної вимірювальної техніки та методик обробки експериментальних даних.

**Наукова новизна результатів,** отриманих дисертантом, полягає в тому, що запропоновано й обґрунтовано нові наукові положення системного підходу до процесів формування гранул у неоднорідному середовищі, а саме:

– вперше створено науково-теоретичні основи для визначення температурного профілю у двошаровій гранулі, що дозволяє враховувати складні взаємодії між шарами гранули, теплопередачу, а також фізико-хімічні властивості використовуваних речовин;

– вперше теоретично проаналізовано вплив пористої структури оболонки на характер теплопровідності, включаючи комплексний аналіз взаємозв'язку між морфологією пор та ефективністю теплопередачі у шарі матеріалу;

– вперше представлено характеристику умов розмежування стадій теплоперенесення в системі «газ – тверда фаза» для псевдозріджених та завислих шарів;

– вперше створено науково-теоретичні основи формування гранул в багатоступеневих апаратах зваженого шару, що відкриває нові можливості для оптимізації процесів гранулоутворення у складних гетерогенних системах та сприяє підвищенню ефективності та якості виробництва гранульованих продуктів у різних галузях промисловості;



– вперше проведено ексергетичний аналіз для раціонального вибору конструкції охолоджувача гранул мінеральних добрив, що дозволяє систематично оцінити ефективність різних конструкцій охолоджувачів з точки зору енергетичних втрат та ефективності використання енергії;

– удосконалено методологічну основу теоретичного розрахунку розпаду струменів та теоретичного визначення розміру крапель рідини під впливом власних коливань у струмені рідини (плаву);

– удосконалено методологічну основу теоретичного аналізу температурного профілю гранул мінеральних добрив уздовж радіуса цієї гранули до її центру, що дозволяє визначати динаміку зміни температури гранули при її конвективному охолодженні у грануляційній башті;

– удосконалено алгоритм розрахунків температурного профілю за допомогою диференційного рівняння Фур'є при граничних умовах 3-го роду шляхом отримання регресійних рівнянь для визначення сталих коефіцієнтів.

**Оцінка висновків здобувача щодо значущості його роботи для науки і практики.** Одержані дисертантом результати мають важливе значення для науки, оскільки вони сприяють розвитку науково-практичних аспектів процесів гранулоутворення в неоднорідних середовищах, що дозволяє не тільки прогнозувати формування гранул із заданими властивостями, але й розробляти науково обґрунтовані підходи до оптимізації технологічних процесів гранулювання, а також вибору високоефективних конструкцій обладнання для підвищення ефективності виробництва та зниження енергетичних витрат.

**Наукова значимість роботи** полягає у розробленні наукових засад вирішення проблем, пов'язаних із підвищенням ефективності процесів у неоднорідних середовищах, що є критично важливим для оптимізації виробництва гранульованих матеріалів і відкриває нові можливості для вдосконалення промислових технологій та мінімізації екологічного впливу виробничих процесів.

**Практична значимість результатів роботи** полягає у розробці математичної моделі та чисельного алгоритму з програмним забезпеченням, які дозволяють точно визначати винос дрібних фракцій із псевдозріджених і завислих шарів, прогножуючи гранулометричний склад як ретурну, так і готового продукту. Врахування таких параметрів, як швидкість газового потоку та витання твердих частинок, дозволяє оптимізувати гідродинамічний режим псевдозрідження для отримання гранул потрібного розміру. Також розроблено методичку термодинамічного та ексергетичного аналізу для вибору ефективних охолоджувачів гранульованих матеріалів, що дозволяє знижувати енергетичні витрати на охолодження та підбирати найбільш енергоефективні конструкції обладнання. Крім того, визначено конструктивно-технологічні параметри поличного гранулятора зі зваженим шаром, які забезпечують реалізацію активного гідродинамічного режиму, що підвищує ефективність промислових процесів та покращує конкурентоспроможність підприємств, які виробляють гранульовані продукти.



**Загальна характеристика структури і змісту дисертаційної роботи та реферату.** Дисертація є завершеною науковою працею, повний обсяг якої становить 339 сторінок та складається з анотації, вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і 5 додатків.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, визначено наукову новизну й практичну цінність одержаних результатів, детально наведено особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертації, структуру та обсяг роботи.

У *першому розділі* здобувачем проведено аналіз літературних джерел та визначено основні способи гранулювання, які є найбільш поширеними у сучасних виробництвах – це диспергування плавів та послідує охолодження утворених гранул у грануляційних баштах (приллювання); обкочування з одночасним диспергуванням плаву на поверхню гранул; диспергування пульпи чи суспензії у псевдозріджений (зважений) шар.

Метод прилювання виявився найбільш рентабельним при високих продуктивностях, зокрема понад 200 тонн на добу, і широко використовується у виробництві гранульованих азотних добрив, таких як карбамід та аміачна селітра. Для отримання гранул пролонгованої дії, які мають оболонку на зародкових гранулах карбаміду, ефективним є спосіб гранулювання обкочуванням на тарілчастому грануляторі з одночасним диспергуванням плаву на поверхню гранул. Міцнісні властивості отриманих гранул залежать від параметрів процесу, таких як швидкість розпилення в'язучої речовини, її концентрація, кількість поданого порошкоподібного ретурі, а також кут нахилу і частота обертання тарілки.

Гранулювання диспергуванням суспензій у псевдозрідженому шарі в апаратах киплячого та завислого шарів довело свою ефективність як раціональний спосіб для виробництва органо-мінеральних добрив пролонгованої дії, завдяки мінімізації витрат на обробку вологих органічних речовин. Активний гідродинамічний режим, що забезпечує збільшення відносної швидкості руху фаз, інтенсифікує процес без зниження економічної ефективності роботи апарата. Для зменшення матеріальних та енергетичних витрат при проведенні тепломасообмінних процесів у зваженому шарі перспективним є використання багатоступеневого протиточного контакту між зріджувальним агентом і дисперсною фазою. Тому гранулювання (чи капсулювання) доцільно проводити в багатоступеному апараті зваженого шару з похилими перфорованими полицями.

Важливою стадією для завершення модифікаційних перетворень всередині гранули є конвективне охолодження, яке забезпечує стабілізацію структури гранул. У зв'язку з цим, у першому розділі роботи розглянуто основні конструкції конвективних охолоджувачів, зокрема поличний охолоджувач-пневмокласифікатор, як найбільш раціональний варіант.

У *другому розділі* викладена загальна методика проведення досліджень, описані експериментальні установки, що були використані для реалізації завдань дисертаційної роботи. Розроблено та обґрунтовано методики експериментальних



досліджень, наведено підходи до обробки результатів та оцінки похибок вимірювань.

Окрім того, визначено методи і засоби математичного моделювання. Моделювання гідродинамічних параметрів неоднорідних систем проводилось на основі класичних принципів гідромеханіки і технічної гідромеханіки, з використанням спеціалізованого програмного забезпечення. Для розв'язання рівнянь математичної моделі застосовувались системи комп'ютерної алгебри. Аналіз отриманих закономірностей здійснювався з використанням диференціальних методів математичного аналізу та інтегрального обчислення.

У *третьому розділі* представлено теоретичний опис умов формування гранул у неоднорідному середовищі «газ – тверда фаза» та проаналізовано вплив конструктивних параметрів корзини обертового вібраційного гранулятора на утворення крапель плаву. Показано, що збільшення швидкості обертання на 70 об./хв. призводить до значного збільшення радіуса факела розпилу. Це дозволяє контролювати розміри факела розпилу, що важливо для прогнозування необхідного діаметра грануляційної башти.

Обґрунтовано механізм утворення крапель плаву на виході з корзини гранулятора під дією власних коливань струменя. Це пояснює процеси, що відбуваються на виході з гранулятора, і дозволяє краще розуміти фізику процесу. Також здобувачем встановлено, що проведення процесу гранулювання карбаміду у тарілчастому грануляторі дозволяє отримувати укрупнені гранули товарної фракції розміром 7–10 мм. При цьому було визначено оптимальні діапазони показників конструктивних та режимно-технологічних параметрів роботи основного технологічного обладнання.

Показано вплив пористості твердого скелета гранул на процес їх теплопровідності при нагріванні в газовому середовищі. Запропонована формула для визначення ефективного коефіцієнта теплопровідності в залежності від величини пористості гранули та істинних коефіцієнтів теплопровідності твердого скелета і газу в порожнинах гранули. Встановлено, що з підвищенням пористості гранули знижується механізм теплопровідності. Отримано аналітичні вирази для визначення температурного профілю та часу нагрівання гранули з урахуванням їх пористості. Показано, що з підвищенням пористості збільшується час нагрівання і знижується температура гранул.

Розроблена математична модель кінетики формування оболонки під час грануляції з урахуванням кількості суспензії, яка розпилюється на частинки ретурну, та приєднання дрібних частинок до сформованих вологих гранул.

У *четвертому розділі* автором обґрунтовано особливості та переваги багатоступеневих апаратів, виявлено перспективи використання цих апаратів для процесу гранулювання, а також обґрунтовано конструкцію апарата із похилими перфорованими полицями.

Надано експериментальні результати дослідження гідродинаміки руху газового потоку у поличному апараті зваженого шару. Представлено результати моделювання гідродинамічної структури руху газодисперсного потоку у гравітаційному поличному апараті за допомогою програмного продукту «Ansys



CFX». Отримано емпіричні рівняння для визначення швидкості газового потоку, при якій реалізовується гідродинамічний режим завислого шару.

Розроблено математичну модель сепарації твердих частинок зі зваженого шару, отримано рівняння для визначення величини виносу твердих частинок із шару за окремими фракціями, а також розроблено математичну модель кінетики гранулювання у багатоступневих поличних апаратах, яка дозволяє визначити розподіл частинок, які гранулюються, за їх розмірами на кожній полиці багатоступеневого гранулятора.

У *п'ятому розділі* представлено теоретичний опис умов впливу на міжфазний теплообмін у неоднорідному середовищі «газ – тверда фаза», а також наведено закономірності охолодження та зміни температури гранул після контакту з повітрям у грануляційній башті.

На основі рівняння, яке отримано здобувачем із рішення диференційного рівняння теплопровідності Фур'є, можна визначати профілі зміни температури всередині твердої частинки (внутрішня задача) та час теплової обробки (нагріву чи охолодження) гранули. Представлено диференціальне рівняння теплового балансу, вирішення якого дозволяє визначити температурний розподіл у завислому шарі (зовнішня задача). Це дозволяє оцінити ефективність теплоперенесення у гравітаційно падаючому, киплячому та зваженому шарах.

Експериментально досліджено міжфазний теплообмін частинок матеріалу з висхідним повітряним потоком. Показано, що найбільша інтенсивність міжфазного теплообміну спостерігається у зоні розвантажувального простору, що пояснюється активною дією газового струменя і, відповідно, сприяє збільшенню активної поверхні теплообміну між газом та гранулою.

У *шостому розділі* розроблено методику ексергетичного аналізу щодо оцінки енергетичних витрат на процеси гранулювання та конвективного охолодження гранульованого продукту, яка дозволяє обґрунтувати вибір оптимальних параметрів зазначених процесів, враховуючи енергетичні витрати та ефективність обладнання.

Проведено ексергетичний аналіз процесів гранулювання у грануляційних баштах без охолоджувача, у грануляційних баштах з охолоджувачем, апаратах киплячого шару та багатоступневих (поличних) апаратах. Також проведено ексергетичний аналіз для раціонального вибору конструкції охолоджувача гранул мінеральних добрив, який дозволяє систематично оцінити ефективність різних конструкцій охолоджувачів з точки зору енергетичних втрат та ефективності використання енергії, що сприяє вибору найбільш економічно доцільного варіанту.

У підсумку, надано рекомендації щодо практичного використання охолоджувачів гранульованих добрив та зернистих сумішей у різних галузях промисловості.

**Висновки** відображають хід розв'язання поставлених у роботі завдань, містять основні результати дисертаційного дослідження, які достатньо повно характеризують науково-практичні досягнення дисертанта.



*Список використаних джерел* містить 383 найменування за темою дисертаційної роботи та достатньою мірою відображає інформацію за темою дослідження, що виконував здобувач.

**Оформлення дисертації** за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам до оформлення дисертацій, затвердженим МОН України, наказ № 40 від 12 січня 2017 року. Мова і стиль викладання дисертації і реферату чітко висвітлюють одержані науково-практичні результати, визначені метою досліджень.

**Повнота викладення результатів дисертації у наукових фахових виданнях.** Основні положення дисертації опубліковано у 42 наукових працях, із яких: 2 монографії у співавторстві, 3 розділи колективних монографій, 23 статті, зокрема, 5 статей у наукових фахових виданнях із переліку МОН України, 16 статей у зарубіжних наукових періодичних виданнях та у виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних (Scopus та Web of Science), 14 матеріалів доповідей у збірниках праць конференцій.

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

**Апробація результатів дисертаційного дослідження.** Матеріали дисертації доповідались та обговорювались на 14 профільних конференціях всеукраїнського й міжнародного рівня.

**Шляхи використання наукових і практичних результатів роботи і ступінь їх реалізації.** Практичні рекомендації щодо впровадження у виробництво малогабаритної мобільної установки для капсулювання мінеральних добрив на базі Товариства з обмеженою відповідальністю «Альянс» (акт впровадження від 15.11.2017 р.), а також виконані напрацювання дослідних зразків гранульованих добрив на органічній основі для Товариства з обмеженою відповідальністю «Білопілля Агросвіт» (акт впровадження від 01.12.2022 р.) та напрацювання дослідних зразків складнозмішаних (комбінованих) добрив спеціального призначення для Товариства з обмеженою відповідальністю «Аграрник» (акт впровадження від 30.06.2023 р.).

Упроваджено в навчальний процес кафедри хімічної інженерії Сумського державного університету наукові результати відповідно до теми НДР «Створення нових гранульованих матеріалів для ядерного палива та каталізаторів в активному гідродинамічному середовищі», ДР № 0120U102036 (акт впровадження від 26.12.2022 р.); відповідно до теми НДР «Виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Технічні науки» Сумського державного університету», ДР № 0121U112684 (акт впровадження від 28.12.2023 р.).

**Ідентичність змісту реферату основним положенням дисертації.** Зміст реферату відповідає розділам дисертації та її основним положенням. Дисертація є одноособово створеною кваліфікаційною науковою працею, яка містить



сукупність результатів та наукових положень, поданих автором для публічного захисту, має внутрішню єдність і свідчить про особистий внесок автора в науку. У дисертації та рефераті не виявлено ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації.

Тематика досліджень відповідає паспорту спеціальності 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології, зокрема пунктам «Теоретичні та експериментальні дослідження гідромеханічних процесів: ... псевдозрідження, коагуляції й гранулювання дисперсних систем; ... встановлення параметрів, необхідних для вибору або створення нового обладнання (... апаратів псевдозрідженого шару, грануляторів і коагуляторів, спеціальних роздільних апаратів, зокрема пінних тощо)», «Теоретичні й експериментальні дослідження теплових і масообмінних процесів теплообміну в газових і рідких системах; ... теплообміну при фазових перетвореннях (зокрема під час барботування й псевдозріджування), при високих швидкостях, за наявності внутрішніх джерел теплоти; теплового випромінювання; масообміну в газових і рідких системах, системах з твердою фазою; ... загальні основи розрахунку тепло- й масообмінного обладнання». Наведені результати визначають технічне спрямування дисертаційної роботи.

#### **Зауваження щодо змісту та оформлення дисертації та реферату:**

1. За представленими зрізами гранул карбаміду (рис. 3.4) важко визначити форму самих гранул.

2. Чим можна пояснити експоненціальний характер збільшення температури гранули від часу її нагрівання за різних значень її пористості (рис. 3.7)?

3. На графічних залежностях (рис. 3.13) видно, що максимум кривої розподілу для часу процесу 20 хвилин і 60 хвилин майже однаковий. Чи автором визначався граничний час процесу гранулювання?

4. На мою думку, враховуючи численні акти впровадження результатів у виробництво, підрозділ 3.6 можна було представити більш широко.

5. Чим це пояснюється, що на графічній залежності (рис. 4.3) крива 2 має дві області максимумів?

6. Чому в як параметр ефективності охолодження гранул було обрано саме коефіцієнт охолодження, а не просто кінцеву температуру гранул?

7. Отримані в дисертаційній роботі наукові результати є надзвичайно актуальними як для нашої країни, так і світової спільноти. Тому вважаю, що доцільним було б подати необхідні документи для отримання патенту за участю здобувача.

8. По тексті дисертації та реферату не всі одиниці представлено в системі СІ (т, хв., мм тощо).

Вказані недоліки не впливають на обґрунтованість положень наукової новизни та позитивний характер одержаних у роботі наукових результатів, висновків і практичних рекомендацій.



### Загальні висновки.

Дисертаційна робота Остроги Руслана Олексійовича виконана на рівні вимог до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук відповідно до п.п. 7, 8, 9 пп. «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 1197 від 17 листопада 2021 р. Дисертація є завершеною науковою працею, що спрямована на вирішення актуальної науково-прикладної проблеми, пов'язаної із розробленням наукових засад формування гранул у неоднорідному середовищі, що є передумовою для отримання продуктів у гранульованому вигляді для різних галузей промисловості. Практична реалізація отриманих дисертантом результатів дозволить підвищити ефективність і якість процесів гранулювання та має значний потенціал для підвищення конкурентоспроможності підприємств, що займаються виробництвом гранульованих продуктів, і сприятимуть подальшому розвитку технологій у цій сфері.

На основі вищезазначеного можна дійти висновку, що Острога Руслан Олексійович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології.

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри екології та  
збалансованого природокористування  
Національного університету  
«Львівська політехніка»



Ярослав ГУМНИЦЬКИЙ

Підпис професора Ярослава Гумницького  
ЗАСВІДЧУЮ:  
Вчений секретар Національного університету  
«Львівська політехніка»



Роман БРИЛИНСЬКИЙ