

ВІДГУК
офіційного опонента доктора технічних наук, професора
Цейтліна Мусія Абрамовича
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

Дисертаційна робота складається з анотації, переліку умовних позначень, вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 383 найменувань, а також 5 додатків. Дисертація викладена на 339 сторінках машинописного тексту і містить 17 таблиць та 67 рисунків.

Актуальність теми дисертаційної роботи, її зв'язок з науковими програмами, планами, темами.

Виробництво гранульованих продуктів є важливим і невід'ємним сегментом сучасної індустрії, оскільки процеси гранулювання знаходять широке застосування у багатьох критично важливих галузях. Це включає сільське господарство, фармацевтичну промисловість, харчову промисловість, а також хімічні і технічні виробництва. Гранульовані продукти, такі як мінеральні добрива, фармацевтичні препарати, харчові добавки і технічні матеріали, забезпечують функціональність і ефективність багатьох технологічних процесів і систем.

В Україні, яка є однією з провідних аграрних країн, ефективне виробництво гранульованих добрив має особливо критичне значення. Сільське господарство в Україні є основним сектором економіки, що забезпечує продовольчу безпеку не тільки на внутрішньому ринку, але й на міжнародному. Якість і доступність мінеральних добрив прямо впливають на врожайність сільськогосподарських культур, що, у свою чергу, визначає продуктивність аграрного сектора.

Ефективне виробництво гранульованих добрив і інших гранульованих продуктів має не лише економічне значення, але й стратегічне для забезпечення продовольчої безпеки країни. Впровадження нових технологій гранулювання може суттєво підвищити якість продукції, знизити витрати на виробництво та зменшити вплив на навколишнє середовище. В умовах глобальної конкуренції та постійно зростаючих вимог до якості продукції, забезпечення ефективних і надійних технологій гранулювання стає важливим завданням для вітчизняної промисловості. Адже інновації у цьому напрямі можуть значно поліпшити ефективність і економічність виробництв, що є важливим для підтримки стабільності та розвитку національної економіки.



Таким чином, обрана тематика дисертаційного дослідження є актуальною, оскільки спрямована на вирішення важливих науково-прикладних проблем, пов'язаних із удосконаленням процесів формування гранул у неоднорідному середовищі. Розроблені наукові підходи і технологічні рішення можуть суттєво вплинути на поліпшення виробничих процесів, зниження витрат і підвищення конкурентоспроможності профільних промислових підприємств.

Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетним напрямкам найбільшої програми Європейського Союзу з дослідження та інновацій Horizon Europe «Monodisperse systems in the production of foodstuff and compound (combined) fertilizers» (грантова угода № 871072).

Робота виконана 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.).

Також у дисертаційній роботі використані результати досліджень, проведених під час виконання госпдоговірних 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.

Достовірність сформульованих у дисертації наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується змістовним аналізом стану проблеми за тематикою досліджень, використання апробованих методик, застосуванням системного підходу, методів аналізу, систематизації та інтерпретації одержаних результатів; використання методів: математичне моделювання гідродинамічних параметрів неоднорідних систем виконувалось на основі класичних положень гідромеханіки та технічної гідромеханіки із використанням програмного

забезпечення FlowVision, Ansys CFX та Ansys Fluent, у свою чергу, аналіз одержаних закономірностей здійснювався із застосуванням диференціальних методів математичного аналізу та інтегрального обчислення за допомогою комп'ютерної техніки та пакету прикладних програм.

Наукова новизна роботи здобувача полягає в тому, що на базі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень отримані такі наукові результати:

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;

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

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

– 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;

– проведено експериментальний 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;

набули подальшого розвитку:

– науково-теоретичні основи процесу гранулювання, який ускладнений умовами сепарації дрібних частинок, що дає можливість прогнозувати гранулометричний склад кінцевого продукту;

– науково-теоретичні основи щодо особливостей зважених шарів із активною гідродинамікою потоків;

удосконалено:

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

– 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;

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

Практична значимість результатів дисертаційної роботи визначається тим, що здобувачем створено та обґрунтовано нові наукові засади для процесів гранулювання у неоднорідних середовищах. Отримані результати дозволяють підвищити ефективність і якість процесів гранулювання завдяки розробці вдосконалених методик і моделей, що враховують специфічні умови виробництва. Це має значний потенціал для підвищення конкурентоспроможності підприємств, які займаються виробництвом гранульованої продукції, а також сприяє подальшому розвитку технологій у цій сфері. Результати дисертаційних досліджень мають таке практичне значення:

1. Розроблено математичну модель з чисельним алгоритмом та програмним забезпеченням для визначення величини виносу дрібних фракцій із псевдозріджених та завислих шарів, що дає змогу визначати гранулометричний склад ретуру та прогнозувати гранулометричний склад готового продукту. Рівняння для визначення величини виносу дрібної фракції мають емпіричний характер та враховують вплив швидкості газового потоку та швидкості витання твердих частинок. Таким чином, алгоритм розрахунку дозволяє підібрати оптимальний гідродинамічний режим псевдозрідження з метою отримання гранул заданого гранулометричного складу.

2. Розроблено методику термодинамічного та ексергетичного аналізів раціонального вибору певних типів охолоджувачів гранульованих мінеральних добрив. Запропонований метод враховує як термодинамічні показники – коефіцієнт охолодження, коефіцієнт рекуперації, термодинамічний коефіцієнт корисної дії, так і ексергетичні – ексергетичний коефіцієнт корисної дії. Такий підхід дозволяє більш коректно оцінити енергетичні витрати на процес охолодження дисперсних матеріалів та підібрати енергозберігаючу конструкцію апарата.

3. Визначено конструктивно-технологічні параметри робочої камери поличного гранулятора зі зваженим шаром, що дозволяє реалізувати активний струменевий гідродинамічний режим зважування. Такий підхід сприяє покращенню ефективності технологічних процесів у промислових умовах і може мати значний вплив на підвищення конкурентоспроможності підприємств, які займаються виробництвом гранульованих продуктів.

4. Розроблено 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

«Білопільля 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.).

5. 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.).

Повнота викладення результатів дисертації у наукових фахових виданнях.

За результатами аналізу поданого автором переліку опублікованих наукових праць виявлено, що всі винесені на захист наукові результати належать автору і з достатньою повнотою відображені 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.

За кількістю, обсягом та якістю наукові публікації відповідають вимогам МОН України щодо публікацій основного змісту та наукових результатів дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Оцінка змісту та структури дисертації.

Зміст роботи відповідає поставленим задачам. Виклад матеріалу системний та послідовний.

У вступі дисертаційної роботи обґрунтовано її актуальність, чітко сформульовано мету та завдання досліджень, а також визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів. Докладно розглянуто особистий внесок здобувача в роботу, представлено результати апробації дослідження, а також зазначені структура та обсяг дисертації.

У першому розділі здобувачем проведено аналіз літератури та визначено основні методи гранулювання, що застосовуються в сучасному виробництві: диспергування плавів з подальшим охолодженням у грануляційних баштах, обкочування з одночасним диспергуванням плаву на поверхню гранул, та диспергування пульпи або суспензії у псевдозрідженому (зваженому) шарі. Зазначено, що метод прилювання є найбільш рентабельним за високої продуктивності та широко використовується для виробництва гранульованих

азотних добрив. Для гранул пролонгованої дії ефективним є гранулювання обкочуванням на тарілчастому грануляторі, при якому плав диспергується на поверхню гранул, що впливає на міцнісні властивості гранул. Гранулювання у псевдозрідженому шарі в апаратах киплячого та завислого шарів є раціональним методом для органо-мінеральних добрив завдяки мінімізації витрат на обробку вологих речовин, а активний гідродинамічний режим сприяє інтенсифікації процесу. Перспективним є використання багатоступеневого протиточного контакту між зріджувальним агентом і дисперсною фазою у зваженому шарі. Важливою стадією є конвективне охолодження для стабілізації структури гранул, зокрема, запропоновано поличний охолоджувач-пневмокласифікатор як ефективний варіант.

У другому розділі представлена загальна методика проведення досліджень, включаючи опис експериментальних установок та розроблені методики експериментальних досліджень, а також підходи до обробки результатів і оцінки похибок вимірювань. Окремо визначені методи математичного моделювання, де моделювання гідродинамічних параметрів неоднорідних систем базувалося на класичних принципах гідромеханіки з використанням спеціалізованого програмного забезпечення. Розв'язання рівнянь моделі здійснювалось за допомогою систем комп'ютерної алгебри, а аналіз отриманих закономірностей проводився з використанням диференціальних методів математичного аналізу та інтегрального обчислення.

У третьому розділі теоретично описано умови формування гранул у неоднорідному середовищі «газ – тверда фаза» та проаналізовано вплив конструктивних параметрів корзини обертового вібраційного гранулятора на утворення крапель плаву. Обґрунтовано механізм утворення крапель на виході з корзини під дією коливань струменя, що пояснює фізику процесу. Досліджено вплив пористості гранул на їх теплопровідність, запропоновано формулу для визначення ефективного коефіцієнта теплопровідності та встановлено, що з підвищенням пористості збільшується час нагрівання і знижується температура гранул. Розроблено математичну модель кінетики формування оболонки гранул з урахуванням кількості суспензії та приєднання дрібних частинок.

У четвертому розділі обґрунтовано особливості та переваги багатоступеневих апаратів для процесу гранулювання, зокрема конструкцію апарата з похилими перфорованими полицями. Представлено експериментальні дослідження гідродинаміки руху газового потоку в поличному апараті зваженого шару та результати моделювання гідродинамічної структури газодисперсного потоку за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Отримано емпіричні рівняння для визначення швидкості газового потоку, що забезпечує режим завислого шару. Також розроблено математичні моделі сепарації твердих частинок і кінетики гранулювання у багатоступеневих

поличних апаратах, які дозволяють прогнозувати розподіл частинок за розмірами на кожній стадії процесу.

У п'ятому розділі розглянуто вплив міжфазного теплообміну в системі «газ – тверда фаза», а також закономірності охолодження і зміни температури гранул у грануляційній башті. На основі рішення рівняння теплопровідності Фур'є здобувачем визначено профілі температури всередині твердої частинки та час їх теплової обробки. Отримано диференціальне рівняння теплового балансу для оцінки температурного розподілу в завислому шарі, що дозволяє аналізувати ефективність теплоперенесення в різних режимах. Експериментально встановлено, що найбільша інтенсивність міжфазного теплообміну відбувається у зоні розвантаження, де активний газовий потік збільшує поверхню контакту між газом і гранулами.

У шостому розділі розроблено методику ексергетичного аналізу для оцінки енергетичних витрат на процеси гранулювання та конвективного охолодження гранульованого продукту, що дозволяє обґрунтувати вибір оптимальних параметрів процесів формування гранул з урахуванням енерговитрат та ефективності обладнання. Проведено аналіз процесів у грануляційних баштах без охолоджувача, з охолоджувачем, в апаратах киплячого шару та багатоступеневих апаратах, а також визначено ефективність різних конструкцій охолоджувачів для мінеральних добрив. Надано рекомендації щодо практичного використання охолоджувачів у різних галузях промисловості для підвищення економічної ефективності виробництва в цілому.

Висновки по роботі достатньо повно відображають хід вирішення поставлених завдань і містять основні результати дисертаційного дослідження.

Відповідність дисертації та реферату встановленим вимогам.

Дисертація й реферат оформлені відповідно до вимог пп. 7 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 1197 від 17 листопада 2021 р., стосовно отримання нових науково обґрунтованих результатів, які в сукупності є суттєвими для поліпшення технологій гранулювання в умовах неоднорідних середовищ, зокрема підвищення ефективності процесів формування гранул, оптимізації енергетичних витрат та вдосконалення конструкцій апаратів для гранулювання.

Висновки та результати дослідження належним чином відображають етапи дослідження, їх цілісність та взаємну обумовленість. Таблиці та рисунки, що розміщені в тексті реферату, забезпечують належне уявлення про теоретичну і практичну цінність дисертаційної роботи. У дисертації та рефераті не виявлено ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації.

Тематика досліджень відповідає паспорту спеціальності 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології за напрямками досліджень:

1. 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).

2. 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.

Зміст реферату й основних положень дисертації ідентичний, не містить положень і результатів, захищених у кандидатській 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.

Оцінка мови та стилю викладення матеріалу.

Дисертаційна робота за структурою, мовою та стилем подання відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України. Текст дисертації представлено технічно грамотною мовою, логічно та послідовно. Ступінь узагальнень, систематизації та формалізації відповідає рівню вимог до докторських дисертацій. Забезпечено взаємозв'язок проведених досліджень та отриманих результатів; викладення наукових положень, результатів і висновків є аргументованим; застосована в роботі термінологія є загально визнаною; стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття.

Рекомендації стосовно використання результатів дисертації.

Результати досліджень рекомендовано застосовувати для вдосконалення технологічних процесів гранулювання у різних галузях промисловості, зокрема у виробництві мінеральних добрив, хімічних речовин, фармацевтичних препаратів та продуктів харчування. Запропоновані методики дозволять оптимізувати роботу обладнання, знизити енергетичні витрати та підвищити якість гранульованої продукції. Подальше впровадження отриманих результатів сприятиме підвищенню ефективності виробництва та покращенню екологічної безпеки технологічних процесів.

Зауваження щодо змісту та оформлення дисертації та реферату:

У процесі аналізу змісту і структури дисертації та реферату виникають зауваження змістовного та редакційного характеру, а саме:

1. На стор. 100 анонсовано використання в дослідженні багатofакторного планування експерименту. Але прикладу застосування такого методу у тексті дисертації не знайдено.
2. Схема поличного багатоступеневого апарата зваженого шару наведена у додатку Б (рис. Б.2, стор. 328) а опис його роботи на стор 104, 105. Така відстань, між схемою та описом, а також відсутність на схемі деталей внутрішніх пристроїв дуже ускладнює розуміння роботи апарату. Те ж стосується рис. В.2: «Схема обертового вібраційного гранулятора».
3. Підрозділ 3.1 починається з рівняння (3.1) руху гранул у повітряному потоці. У тексті нема однозначних вказівок: чи знайдено це рівняння у літературі, чи отримано автором самостійно. У будь якому випадку було би доцільно надати інформацію про прийняті припущення, граничні умови, та схему фізичної моделі. Це ж стосується і інших рівнянь у цьому підрозділі.
4. Виходячи з виду рівняння (3.1), яке містить 2 координати x та y , автором прийнята плоска фізична модель руху гранул, у той час, коли траєкторія струменів, а потім і гранул, явно об'ємна, особливо, одразу після виходу з корзинки, що обертається. Це, а також постійне значення коефіцієнту опору матеріалу, який за час руху є струменем, потім краплями і нарешті гранулами, потребує коментарів.
5. У підрозділі 3.1 відсутні назви величин, що відкладені на осях та інформація про розмірності змінних.
6. Пошук рівняння для розрахунку V_z , як написано на стор. 116 здійснювався у вигляді многочленів виду (3.3). Відсутнє обґрунтування чому у якості таких многочленів було обрано саме поліном другого ступеню і саме неповний, а також процедура цього пошуку.
7. Не ясно з якою метою у рівняннях (3.4) – (3.6), у якості незалежних факторів обрано A_1 , A_3 , v_0 , p_{z0} , які очевидно є сильно корельованими поміж себе, та чи проводився аналіз значущості цих факторів і елімінація незначних.
8. У коментарі до рис. 3.4, наведено фото, на якому має бути видно експериментально встановлену агломерацію дрібних частинок, та суттєві відхилення форми гранул від сферичної. Насправді це майже неможливо. Агломерація не виділена, а форма гранули на може бути ідентифікована за невеликою її частинкою, знятою на фото.
9. У підрозділі 3.5.2 на основі розрахунків по математичній моделі, яка розроблена у підрозділі 2.5.1, зроблено висновок про пряму пропорційність збільшення товщини оболонки від часу обробки гранул у киплячому шарі. У зв'язку з відсутністю у дисертації інформації про

оціноку похибки, валидацію та верифікацію згаданої вище математичної моделі важко переконливо оцінити адекватність цього висновку.

10. Підрозділ 4.1. фактично є фрагментом літературного огляду, де було б доцільно його розмістити.
11. Можна лише здогадуватися, що апарат на рис. 4.2 був об'єктом дослідження, а інформація, наведена у підрозділі 4.2, – його результатом. Але ні це, а ні інше у тексті явно не вказано.
12. Вважаю застосоване автором (рівняння (5.2)). вираховування кінцевої температури гранул по часу їх перебування у грануляторі є надмірно складним та неточним. Час перебування не є незалежною величиною та потребує дуже далекого від реальності припущення про лінійну залежність зміни температури повітря, по висоті грануляційної башти.

Зазначені зауваження не знижують цінність отриманих дисертантом результатів і не носять принципового характеру.

Загальний висновок.

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 розроблення науково-методологічного підходу до впровадження комплексного рішення, яке дозволяє системно узагальнити процеси формування гранул у неоднорідних середовищах. Практична реалізація отриманих дисертантом результатів сприятиме оптимізації процесів гранулювання, підвищенню ефективності використовуваного обладнання та зниженню енергетичних витрат. 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 хімічної техніки
та промислової екології

Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»

Мусій ЦЕЙТЛІН

Підпис *Мусій Цейтлін*
ЗАСВІДЧУЮ:
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
" " " 20... р.

