

ВІДГУК

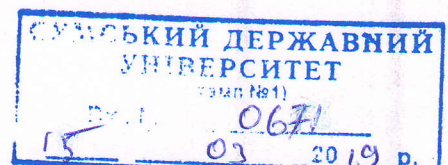
офіційного опонента, д.т.н., професора Нікольського Валерія Євгеновича на дисертаційну роботу Симака Дмитра Михайловича на тему:

«Науково-теоретичні основи масообміну у системах з твердою фазою», яку представлено на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.08 - процеси та обладнання хімічної технології

Хімічна промисловість України є однією з провідних галузей економіки, яка створює фундамент економічного зростання і соціального прогресу суспільства. Вона здійснює визначальний вплив на економічну ситуацію у державі забезпечуючи реалізацію національних інтересів в умовах глобалізації. Від її ефективності залежить розвиток економіки, оскільки вона забезпечує інші галузі промисловості новими продуктами. Разом із цим, хімічна промисловість є одним з найбільших забруднювачів навколишнього середовища, однак, вона також займається і утилізацією виробничих відходів, використанням їх як вторинної сировини.

Наукові розробки в галузі процесів та апаратів мають важливе значення для розвитку хімічної промисловості України як у плані створення нових високоефективних методів перероблення сировини, так і у вдосконаленні існуючих технологічних процесів щодо енерго- і ресурсозбереження, зменшення собівартості та покращення якості готової продукції. Впровадження високоефективних науково обґрунтованих інноваційних технологій у хімічну промисловість забезпечить її конкурентоздатність на внутрішньому і зовнішньому ринках. Більшість технологічних процесів у хімічній промисловості відбуваються у системах тверде тіло – газ, тверде тіло – рідина або тверде тіло – рідина – газ. Дослідження вказаних процесів є складним багатофакторним завданням, рішення якого вимагає великого обсягу теоретичних та емпіричних досліджень. Існуючий обсяг інформації щодо закономірностей тепломасообміну та гідродинаміки у системах з твердою фазою, в багатьох випадках носить приватний характер і є недостатнім для проектування енергоефективних ресурсозберігаючих технологій. Це стосується таких процесів, як розчинення полідисперсних сумішей твердої фази неорганічних та органічних сполук, абсорбції у трифазній системі тверда речовина – рідина – газ, методів інтенсифікації процесів масообміну тощо. Вирішенню цих проблем і присвячена дана дисертація.

Актуальність результатів дисертаційних досліджень підтверджується ще й тим, що вона відповідає пріоритетним напрямам розвитку науки і техніки в Україні на період до 2020 р. (Закон України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», ст. 3, пп. 1, 3, 4) та стратегічним пріоритетним напрямам інноваційної діяльності в Україні на 2011–2021 рр, плану науково-дослідних робіт кафедри процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв Сумського державного університету, зокрема з темою «Гідродинамічні показники двофазних потоків тепломасообмінного,



грануляційного та сепараційного обладнання» згідно з науково-технічною програмою Міністерства освіти та науки України (номер держреєстрації 0115U002551).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі Симака Д.М. базується на критичному аналізі вітчизняних та іноземних джерел літератури (292 найменувань) за даною проблемою, постановці мети і задач дослідження, використанні сучасних методів досліджень, аналізі отриманих результатів і порівнянні з результатами інших дослідників, формулюванні отриманих висновків. Теоретичний аналіз виконувався на основі складання математичних моделей та їх рішення аналітично (з використанням методу заснованому на перетвореннях Лапласа), а експериментальні дослідження виконані з використанням сучасного лабораторного обладнання та комп'ютерної техніки, обробка результатів експериментальних досліджень здійснювалась із застосуванням прикладних пакетів MathCAD та MS Excel.

Достовірність результатів досліджень забезпечується коректною постановкою і вирішенням завдань з використанням фундаментальних положень гідродинаміки і тепломасообміну із застосуванням стандартних процедур математичного аналізу, відповідністю змісту математичних конструкцій суті досліджуваних процесів, використанням апробованих методик проведення експериментальних досліджень, виконаними експериментами, використанням сучасних прикладних комп'ютерних програм для обробки результатів експериментальних досліджень. Адекватність математичних моделей запропонованих автором підтверджено експериментально. Наукові положення та теоретичні висновки у своєму логічному викладенні не суперечать основним положенням сучасних теорій з гідродинаміки і тепломасообміну у системах тверде тіло – газ, тверде тіло – рідина, тверде тіло – рідина – газ.

Наукова новизна отриманих результатів. Автор дисертації захищає 12 наукових положень, які у роботі кваліфікуються як наукова новизна.

Зокрема:

- критеріальні рівняння для визначення втрат тиску, коефіцієнтів тепло- і масовіддачі, розрахункові залежності для визначення коефіцієнтів дифузії у стаціонарному шарі досліджуваних матеріалів, що дають змогу прогнозувати енергетичні затрати на процес фільтраційного сушіння досліджуваних матеріалів, визначати основні конструктивні розміри сушильного обладнання;
- критеріальні рівняння для визначення коефіцієнту масовіддачі під час розчинення одинарних частинок, які враховують зміну об'єму рідкої фази під час розчинення внаслідок зміни концентрації;
- одержану функцію розподілу частинок під час процесу розчинення полідисперсних сумішей за умови зміни рушійної сили, що дало змогу визначити масову частку розчинної солі залежно від безрозмірного часу;

- математичну модель складного промотечійно-протитечійного процесу розчинення калійної руди;
- кінетичні закономірності нестационарних процесів розчинення твердих речовин у стаціонарному шарі зернистого матеріалу, що дають змогу прогнозувати інтенсивність процесу по висоті апарату і в часі;
- математичну модель екстрагування розчинної речовини з твердих одинарних частинок плоскої та кулястої форми та з шару зернистого матеріалу, що дає змогу визначити концентрацію компонента для певної висоти шару та необхідного часу екстрагування;
- розрахункові залежності для визначення коефіцієнтів внутрішньої дифузії під час екстрагування твердого купрум сульфату з капілярів за постійного і періодичного вакуумування системи;
- теоретичні залежності масообміну у трифазній системі газ – рідина – тверде тіло;
- математичні моделі процесу фізичної абсорбції та хемосорбції сульфур (IV) оксиду, що дало змогу визначити ступені очищення та оцінити вплив твердої фази на процес очищення
- розрахункові залежності, які дають змогу прогнозувати кінетику екстрагування розчиненого купруму сульфату з пористих частинок каоліну з урахуванням інтенсивного перемішування у замкнутому періодичному процесі;
- теоретичні аспекти інтенсифікації фізичного розчинення твердих тіл в умовах вакуумування системи за рахунок парових бульбашок розчинника;
- результати теоретичних і експериментальних досліджень дифузійно контрольованих процесів розчинення твердих тіл, які супроводжуються значним тепловим ефектом у зоні взаємодії
- математичну модель нестационарного процесу теплообміну з поверхневим джерелом тепла, що дає змогу визначити температури у твердому тілі та рідинному середовищі.

Практичне значення дисертації. Отримані в критеріальній формі рівняння дають змогу прогнозувати гідродинаміку, тепло- і масообмін досліджуваних процесів та, відповідно, енергетичні затрати і економічну доцільність застосування цих методів для конкретних дисперсних матеріалів. Запропоновані методики розрахунку полідисперсних процесів розчинення, стаціонарних та нестационарних процесів масообміну та визначені ефективні коефіцієнти дифузії під час екстрагування розчинних та твердих компонентів з твердих частинок дають змогу прогнозувати ці процеси та встановлювати їх ефективність та економічну доцільність на етапі розроблення технологічного процесу. Практична реалізація досліджень також підтверджується актами впровадження на ДП «Сумський державний науково-дослідний інститут мінеральних добрив і пігментів» (акт впровадження від 18.05.2018 р.), ТзОВ «Інститут «ГІРХІМПРОМ» (акт впровадження від 11.09.2018 р.), ДТЕК

Добротвірська ТЕС (акт впровадження від 23.03.2018 р.) і в навчальний процес для лекційних та практичних курсів у Сумському державному університеті.

Значення результатів роботи для науки та практики. Запропоновані автором математичні моделі для процесів сушіння, розчинення та екстрагування в системі тверде тіло – газ, тверде тіло – рідина забезпечують розв'язання актуальних теоретичних та прикладних проблем для хімічної промисловості. Одержані розв'язки диференціальних рівнянь молекулярної дифузії, які враховують зміну концентрацій у рідкій фазі, та теплопровідності з поверхневим джерелом тепла є важливими для практичного застосування бо дають змогу прогнозувати енергетичні затрати на етапі проектування нових технологічних процесів. Розроблені на основі узагальнення теоретичних та експериментальних досліджень технологічні схеми можна рекомендувати для використання в практичній діяльності науково-дослідних і проектно-конструкторських установ хімічної, харчової та гідрометалургійної промисловості.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях. Основні результати досліджень опубліковано у 36 наукових працях: з них 22 статті, зокрема 21 стаття у наукових фахових виданнях з переліку МОН України, з яких 9 статей у виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами, та 1 публікація у фаховому виданні іноземних держав, 12 публікацій у матеріалах та працях конференцій, отримано 2 патенти України на корисну модель.

Зміст автореферату є ідентичним до основних положень дисертації та оформлений згідно з чинними вимогами.

Оцінка змісту дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 393 сторінки; основного тексту – 317 сторінок. Дисертаційна робота містить 18 таблиць та 84 рисунки по тексту, список використаних джерел із 292 найменувань на 34 сторінках, 7 додатків на 16 сторінках.

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами, темами, наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача у проведених дослідженнях та публікаціях.

У першому розділі дисертант приводить критичний огляд джерел літератури, в якому висвітлює сучасний стан теоретичних аспектів тепло- і масообміну у системах з твердою фазою, а саме сушіння твердих матеріалів у стаціонарному шарі, розчинення та екстрагування з твердої фази, процеси у трифазній системі та сумісний тепломасообмін у системі тверде тіло – рідина, на основі яких робить висновки, що в наявних публікаціях недостатньо вивчені питання гідродинаміки, динаміки і тепло- і масообміну у системах тверде тіло – газ, тверде тіло – рідина. На основі аналізу джерел інформації сформульовані

мета і задачі досліджень.

У другому розділі представлено методики теоретичних і експериментальних досліджень та схеми експериментальних установок. Обґрунтовано вибір об'єктів дослідження та наведені їх основні фізико-хімічні і фізико-механічні характеристики. Представлено статистичний метод оцінки достовірності результатів.

Третій розділ присвячений експериментальному дослідженню гідродинаміки фільтрування теплового агенту крізь шар сухого і вологого матеріалів та його теоретичному узагальненню. Для опису втрат тиску в шарі дисперсного матеріалу автор використовує внутрішню задачу гідродинаміки, проводить аналіз отриманих результатів, використовуючи метод теорії подібності (рівняння 3.6 – 3.8). Наведені результати визначення коефіцієнтів тепловіддачі під час фільтрування теплового агенту крізь шар сухого і вологого матеріалу, а також коефіцієнтів масовіддачі. Узагальнення отриманих результатів, як це загально прийнято, проводилось методом теорії подібності і представлено у вигляді критеріальних рівнянь $Nu = f(Re, Pr, \Gamma)$ і $Sh = f(Sc, Pr, \Gamma)$ (рівняння 3.21 – 3.24, 3.28 – 3.29). На основі кінетики сушіння зерна пшениці, яка містить лише внутрішню вологу і сирцевих гранул шлакового гравію визначено параметри внутрішнього волого перенесення та у таблицях 3.7 і 3.8 представлено залежності коефіцієнта внутрішньої дифузії від температури.

У четвертому розділі проаналізовано нелінійну зміну об'єму та концентрації під час розчинення, коли густина рідинного середовища та його об'єм є змінними величинами особливо в області високих концентрацій. Наведено результати дослідження процесу розчинення полідисперсної суміші твердої фази, та на основі функції розподілу частинок за їх діаметром, методом графічного інтегрування визначено зміну концентрації твердої речовини у часі. Розглянуто кінетику прямотечійного неперервного розчинення частинок бензойної кислоти у вертикальному апараті та експериментально визначено концентрації кислоти на різних висотах. Представлено розчинення стаціонарного шару, що моделює періодичний процес розчинення шару твердої фази. Наведено результати експериментальних досліджень під час вакуумування системи коли рідина закипає і утворена парова фаза у вигляді бульбашок безпосередньо діє на пограничний дифузійний шар, що суттєво інтенсифікує процес розчинення.

П'ятий розділ присвячений дослідженню внутрішньої дифузійних масообмінних процесів у твердій фазі під час екстрагування. Розглянуто теоретичні процеси екстрагування на прикладі одинарних частинок у формі необмеженої пластини та кулі. Необмежена пластина імітує процес екстрагування цукру з бурякової стружки, а частинки кулястої форми представляють подрібнену дисперсну фазу. Наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень екстрагування купрум сульфату з капіляру та визначено коефіцієнт внутрішньої дифузії з врахуванням переміщення границі

твердої фази у капілярі, екстрагування розчинного компоненту з інертного шару зернистого матеріалу. Визначено коефіцієнти масовіддачі та представлено їх значення у безрозмірних комплексах. Представлена математична модель даного процесу дає змогу прогнозувати необхідний час екстрагування.

У шостому розділі наведено принципіальну схему масообміну у трифазній системі і показано модель розподілення концентрацій у системі газ – рідина – тверде тіло. На прикладі очищення викидних газів теплових електростанцій від діоксиду сірки водною суспензією кальцій карбонату розглянуто фізичну абсорбцію діоксиду сірки і хемосорбцію та встановлено коефіцієнт прискорення внаслідок хемосорбційного процесу. Представлено теорію масообмінного процесу у трифазній системі газ – рідина – тверде тіло для процесів з постійною поверхнею твердої фази та за умови змінної поверхні кальцій карбонату. Наведено залежність ступеня очищення газового середовища від співвідношення твердої фази та газорідинної.

Сьомий розділ присвячений дослідженню тепломасообмінних процесів у системі тверде тіло – рідина на прикладах дифузійно контрольованого процесу розчинення, яке супроводжується значними тепловими ефектами, на прикладі взаємодії між цинком та розчином хлорної кислоти, а також частинки магнію та розчином нітратної кислоти. Показано, що зростання температури і виділення водню на поверхні твердого тіла сприяють інтенсифікації розчинення. Виділення водню в зоні реакції збільшують коефіцієнти масовіддачі, а зростання температури змінює фізико-хімічні параметри процесу. В розділі наведено методику розрахунку зміни температури на основі диференціального рівняння теплопровідності з постійно діючим джерелом тепла для напівбезконечного стержня та кулі. Наведено співставлення розрахованих значень з експериментальними даними.

У восьмому розділі представлено результати експериментального дослідження розчинення калійної руди, основу якої складають сполуки калій хлориду та калій сульфату та визначено коефіцієнти масовіддачі під час їх розчинення. На основі рівнянь матеріального балансу та кінетики для трьох апаратів-розчинників розроблено математичну модель розчинення, яка імітує реактор ідеального перемішування. Наведено розв'язок математичної моделі з визначенням відносного розміру частинок. Представлено принципіальну схему очищення димових газів від діоксиду сірки. Наведено методику розрахунку процесу фільтраційного сушіння.

У висновках викладено основні результати дисертаційної роботи.

У додатках наведені акти впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво та список публікацій здобувача за темою дисертації.

Зв'язок докторської дисертації з кандидатською. Положення та висновки, захищені здобувачем у кандидатській дисертації, в тексті докторської дисертації не виявлені.

Разом із цим, до дисертаційної роботи Симака Д.М. є наступні зауваження:

1. сторінка 5 тексту «Візуально визначена швидкість переміщення та визначено коефіцієнт внутрішньої дифузії, який дорівнює $1,35 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с} \dots$ » у процесі екстрагування за постійного вакуумування. Не зрозуміло як візуально може бути визначена швидкість, при такому незначному коефіцієнті дифузії і наскільки воно відповідає дійсності.

2. сторінка 31 тексту розділ «Мета та завдання досліджень», вказано «...мета роботи полягає у встановленні механізму та закономірностей процесів тепло масообміну та гідродинаміки у системі тверде тіло – газ, тверде тіло – рідина, тверде тіло – рідина – газ...» з наведених у літературному обзорі джерелах (292 джерела), та посилань на їх і їх критичному аналізі ці закономірності давно встановлені а автор у своїй роботі тільки доповнює чи уточнює ці залежності або розглядає нові на його погляд особливості вказаних процесів, но не встановлює механізм та закономірності процесів тепло масообміну та гідродинаміки у перелічених системах.

3. сторінка 35 розділ «Практичне значення одержаних результатів», вказано «...запропоновано ефективний природоохоронний метод очищення газового середовища від діоксину сірки...» переводом його у розчин у трифазній системі газ – рідина – тверде тіло, незрозуміло у чому полягає його ефективність. У металургії застосовується метод вологого очищення газів з переводом забруднюючих газів у розчин. Недоліком вказаного методу є те що розчин з забруднюючим газом теж треба знешкоджувати. Не зрозуміло у чому полягає ефективність запропонованого методу.

4. Літературні джерела у дисертаційній роботі подано не згідно порядку на їх посилання у тексті, наприклад, стор. 39-40 тексту посилання на джерела 5-6 а на сторінці 40 на джерела 59-79 і т.д., а на сторінці 42 на джерела 45-102.

5. Синергетично не пов'язані між собою дослідження процесів тепло- і масообміну. Автор досліджує масообмінні процеси, визначає коефіцієнти масовіддачі а потім досліджує теплообмін у досліджених системах з твердою фазою.

У випадку теплообміну ускладненого масообміном рекомендується використовувати залежність $Nu = A Re^n Pr^{0,33} Gu^m$ (сторінка 49), а коефіцієнти A , m , n – одержуються експериментальним шляхом. Автор в результаті досліджень наводить артеріальне рівняння $Nu = A Re^n Pr^{0,33}$ (3.19-3.24). Незрозуміло, що автору завадило одержати критеріальне рівняння теплообміну ускладненого з масообміном, та об'єднати ці процеси.

6. Робота насичена повторами матеріалу. Кожен розділ автор починає з аналізу проблематики і дублює матеріал з літературного огляду. Крім цього, застосовуючи критерії Sh , Sc , Re , Pr , Gr , Nu а також коефіцієнти ν , μ , α , β , λ – кожного разу надає їх пояснення у відповідних формулах. Доцільно було-б винести цей матеріал у окремий підрозділ а не пояснювати їх кожного разу при їх застосуванні. Це значно збільшує обсяг роботи.

7. На рисунках 3.7-3.8 наводиться залежність коефіцієнту тепловіддачі α від дійсної швидкості. З тексту роботи незрозуміло яким чином автор отримав показник цієї швидкості.

8. Невідповідність кількості позицій винесених на рисунках (наприклад рис. 4.2) опису позицій під рисунками. На рисунку винесено 9 позицій, а в описі їх 6.

9. В роботі відсутня методологія масштабного переходу. Незрозуміло яким чином результати досліджень, що отримані в лабораторних умовах, можуть бути втілені в промислових масштабах. Незрозуміла методологія їх застосування у 2-х 3-х фазних складних системах, які розглядаються у роботі. Теорія подоби не може бути адекватно застосована у цих випадках, тому що вона не враховує вплив зон, а також кінцеві ефекти (наприклад стоки теплоти).

10. Відсутня промислова апробація роботи а також її комерційна складова.

Вказані зауваження не стосуються принципових наукових положень дисертації та не зменшують її наукову та практичну цінність.

Висновок. Аналізуючи позитивний науковий доробок автора і вище відзначені зауваження вважаю за необхідне зробити наступний висновок: дисертаційна робота Симака Д. М. на тему: «Науково-теоретичні основи масообміну у системах з твердою фазою» є завершеною науковою працею, в якій одержано нові наукові результати, які в сукупності вирішують важливу науково-практичну проблему, суть якої полягає у створенні наукового підґрунтя інтенсифікації тепломасообмінних процесів у системах з твердою фазою та відповідає вимогам пунктів 9, 10, 12 "Порядку присудження наукових ступенів" затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 №567, зокрема, вимогам щодо наукової новизни і практичного значення, обґрунтованості і вірогідності сформульованих наукових положень, висновків і рекомендацій, повноти і її завершеності, а її автор Симак Дмитро Михайлович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології.

Офіційний опонент

доктор технічних наук, професор,

Нікольський В.Є.

Підпис професора Нікольського В.Є.
засвідчую:

Вчений секретар



О.В. Охмис