

УДК 621.039.1; 621.039.542/.544, 661.097.3; 542.978

УКПІ

№ держреєстрації 0120U102036

Інв. №

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
40007, м. Суми, вул. Р–Корсакова, буд. 2;
тел. (0542) 33-41-08/33-40-49

ЗАТВЕРДЖУЮ

проректор з наукової роботи
д-р. фіз.-мат. наук, професор

_____ А.М. Черноус

**ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ**

Створення нових гранульованих матеріалів для ядерного палива та каталізаторів в активному гідродинамічному середовищі

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
АКТИВНИХ ГІДРОДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ТА ПРОЦЕСІВ,
ЩО СУПРОВОДЖУЮТЬ ГРАНУЛОУТВОРЕННЯ
ЗА ЗОЛЬ-ГЕЛЬНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ
(проміжний)**

Керівник НДР
д-р. техн. наук, професор

В.І.Склабінський

2021

Рукопис закінчено __ грудня 2021 р.

Результати цієї роботи розглянуті науковою радою, протокол від 23.12.2021 р. № 7

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР головний науковий співробітник д-р. техн. наук	___.12.2021	В.І.Склабінський (реферат, висновки)
Відповідальний виконавець старший науковий співробітник канд. техн. наук	___.12.2021	М.С.Скиданенко (вступ, розд.1-3, висновки до розділів)
Провідний науковий співробітник д-р. техн. наук	___.12.2021	О.О.Ляпощенко (реферат, розд.1-3, висновки)
Старший науковий співробітник д-р. техн. наук	___.12.2021	І.В.Павленко (розд.1-2, висновки до розд.2-3)
Старший науковий співробітник д-р. техн. наук	___.12.2021	В.О.Іванов (розд.1, підрозд.2.3, висновки до розд.1-2)
Виконавець цивільно-правового договору	___.12.2021	Р.О.Острога (розд.1, 3, висновки до розділів)
Виконавець цивільно-правового договору	___.12.2021	В.М.Покотило (підрозд.1.3, додатки)

Виконавець цивільно-правового договору	___.12.2021	М.П.Юхименко (розд.1, 3, висновки)
Виконавець цивільно-правового договору	___.12.2021	О.Є.Старинський (розд.1, підрозд.3.1, додатки, висновки до розд.1)
Виконавець цивільно-правового договору	___.12.2021	К.В.Сімейко (підрозд.2.3, додатки)
Виконавець цивільно-правового договору	___.12.2021	М.М.Дем'яненко (розд.1-2, додатки, висновки до розд.1-2)
Виконавець цивільно-правового договору	___.12.2021	В.В.Яковчук (розд.2, додатки)
Виконавець цивільно-правового договору	___.12.2021	Д.О.Ярошенко (розд.1, 3, додатки)
Виконавець цивільно-правового договору	___.12.2021	А.С.Крощенко (розд.2, додатки)
Виконавець цивільно-правового договору	___.12.2021	В.А.Шматенко (розд.1,3, додатки)
Виконавець цивільно-правового договору	___.12.2021	О.О.Мандрика (розд.3, додатки)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 142 с., 23 рис., 4 табл., 89 джерел.

ВІБРОГРАНУЛЯЦІЯ, ГРАНУЛА, ГРАНУЛОУТВОРЕННЯ, ГРАНУЛЯЦІЯ, ТЕХНОЛОГІЯ ГРАНУЛЮВАННЯ, ГІДРОДИНАМІКА, ЗОЛЬ-ГЕЛЬ.

Об'єкт дослідження – процес гранулоутворення нових матеріалів для ядерного палива та каталізаторів з покращеними властивостями.

Мета роботи – формування наукових засад забезпечення технологічних умов створення нових гранульованих речовин, оксидів металів, зокрема для ядерного палива та каталізаторів, на золь-гельній основі шляхом інтенсифікації гідродинамічних і тепломасообмінних процесів за рахунок накладання зовнішнього вібраційного впливу.

Методи дослідження. Основні теоретичні та експериментальні залежності, що описують гідродинамічні та тепломасообмінні процеси при гранулоутворенні, визначаються диференціальними методами математичного аналізу та інтегрального обчислення із застосуванням CAS-систем. Під час проведення експериментальних досліджень застосовано сучасні засоби вимірювання параметрів дисперсності гранул і контролю витрат індукційним способом, системи безконтактних струмовихрових датчиків механічних коливань та їх спектральний аналіз, методи масспектрометрійного та оптико-емісійного аналізу, електроакустичної та ЯМР-спектрометрії, а також використано системи перетворювачів з подальшим трансформуванням сигналу із застосуванням апаратно-програмних засобів побудови комплексних систем автоматички, їх компіляції та програмування.

Описано загальну методику експериментальних досліджень і моделювань, стратегічне та тактичне планування експериментів з описом експериментальних і дослідних установок. Розвинуто теоретичні основи моделювання процесу віброгрануляції дисперсних матеріалів за золь-гельною технологією, розроблено моделі руху краплин, осадження золю в гелі, нанесення шару покриття на

модельні мікросфери. За результатами експериментальних досліджень надано рекомендації щодо режимно-технологічної та апаратурно-конструктивної оптимізації процесу гранулоутворення за золь-гельною технологією.

ЗМІСТ

с.

Вступ.....	8
1 Методика проведення експериментальних досліджень	10
1.1 Загальна методика експериментальних досліджень і моделювань. Стратегічне та тактичне планування експериментів	10
1.2 Вибір та порівняльна оцінка методів досліджень. Оцінка похибок вимірювань та адекватності результатів моделювань.....	19
1.3 Опис експериментальних установок. Заходи з модернізації дослідного стенду	21
1.4 Висновки до розділу 1.....	33
2 Теоретичні основи моделювання процесу віброгрануляції дисперсних матеріалів за золь-гельною технологією	34
2.1 Математичне моделювання гідромеханічних процесів під час руху краплин золю від диспергатора до контакту з розчином аміаку	34
2.2 Математична модель процесу осадження краплин золю в з розчині аміаку.....	51
2.3 Особливості витікання стисненого струменя через отвір з урахуванням нахилу отвору та попередньої циркуляції.....	65
2.4 Висновки до розділу 2.....	78
3 Експериментальні дослідження з режимно-технологічної та апаратурно- конструктивної оптимізації процесу гранулоутворення за золь-гельною технологією	81
3.1 Фізико-механічні властивості гранул двоокису алюмінію	81
3.2 Витікання через отвір при стисканні струменя з урахуванням нахилу отвору та циркуляції перед отвором	83
3.3 Дослідження залежності швидкості переміщення частинок в змійовику промивача	92

3.4 Алгоритм розрахунку пульсаційного змійовикового промивача	95
3.5 Висновки до третього розділу	99
ВИСНОВКИ.....	102
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЬ.....	104
ДОДАТКИ.....	

ВСТУП

В період інтенсивного розвитку промислової хімії особлива увага приділяється каталізу, оскільки можливість прискорювати хімічні реакції у необхідному напрямку без втрат енергії і без втрат самої речовини каталізатора, надали каталізу вагому практичну значимість. У останні роки каталізатори стали використовувати поряд з хіміко-технологічними процесами для вирішення енергетичних та екологічних задач, таких, як створення топливних елементів, очищення вихлопних газів транспорту та промислових виробництв. Порошки і гранули оксидів важких металів мають високий попит в якості напівпродуктів для отримання дрібнозернистої кераміки широкого спектру застосування: ядерні (атомні) паливні та тепловидільні елементи (ТВЕЛ) для атомних електростанцій, сажові фільтри, конструкційна кераміка, каталізатори та їх носії, вироби біомедичного призначення (протези).

Відомо декілька способів отримання каталізаторів, але найбільш перспективним напрямком отримання каталізаторів та їх носіїв є золь-гельний метод їх виробництва. До переваг цього метода можна віднести можливість отримання золю заданого складу та структури, рівномірного розподілу складових речовин по об'єму частинки каталізатора. Для виробництва ядерного палива та каталізаторів у вигляді таблеток з пресованих мікросфер пропонується золь-гельна технологія, заснована на мокрохімічному способі одержання мікросфер із солей розчинів важких металів, що включає одержання розчину важкого металу і золю, утворення і гелірування краплин (перетворення золю у краплі в гель), одержання з наступним промиванням та сушінням гель-сфер, відновлення й прокалювання частинок.

Продовжуючи дослідження процесу гранулоутворення за золь-гельною технологією, в даній науково-дослідній роботі отримали подальшого розвитку математичні моделі впливу активних гідродинамічних режимів на тепломасообмінні процеси під час гранулоутворення, вперше визначено частотні діапазони та граничні значення переходу між режимами розпаду струменя на

краплі та амплітудами коливань краплі. Дослідження дозволили розширити уявлення про гідродинамічні процеси при гранулоутворенні за золь-гельною технологією, в тому числі отримати подальший розвиток математичних (числових) моделей процесу вібраційної грануляції в активному гідродинамічному середовищі гелю із використанням CAS-систем і засобів штучного інтелекту. Були обґрунтовані параметри, що впливають на характеристики отриманого продукту за золь-гельною технологією, а також отримані рекомендації щодо підвищення енергоефективності процесу гранулоутворення.

Дослідження, проведені у даній науково-дослідній роботі, дозволили розвинути теоретичні основи моделювання процесу віброгрануляції дисперсних матеріалів за золь-гельною технологією, розробити моделі руху краплин, механізм осадження золю в гелі та нанесення шару покриття на модельні мікросфери. За результатами експериментальних досліджень були надані рекомендації щодо режимно-технологічної та апаратурно-конструктивної оптимізації процесу гранулоутворення за золь-гельною технологією.

Виходячи з нових наукових та практичних результатів, метою даної роботи є аналіз та узагальнення результатів досліджень, розробка практичних рекомендацій щодо створення нових гранульованих матеріалів для ядерного палива та каталізаторів в активному гідродинамічному середовищі, а також впровадження наукових розробок та огляд перспектив використання отриманих результатів.

1 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Загальна методика експериментальних досліджень і моделювань.

Стратегічне та тактичне планування експериментів

Процес отримання гранул Al_2O_3 за золь-гельною технологією включає декілька послідовних стадій, таких як приготування золю, диспергування золю на дисперсні частини, осідання краплин золю в гелі з подальшим затвердінням, промивка гель-сфер, сушка та прокалювання гранул. Від особливостей протікання даних стадій та від властивостей сировини залежить монодисперсність та фізико-хімічні властивості гранул (міцність, діаметр гель-сфер та насипна густина)[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

Також слід звертати увагу на способи нанесення захисних покриттів (піровугецю) на гранули, які покращують їх фізико-хімічні властивості, а саме поверхневу міцність, що розглянуті в роботах [14, 15, 16, 17].

Також одним із важливих питань якому необхідно приділяти увагу, це остання стадія життєвого циклу ядерного палива, а саме його утилізація та дезактивація територій забруднених радіоактивними речовинами [18, 19]

Експериментально-дослідна установка для отримання каталізатора Al_2O_3 . Методика експериментальних досліджень процесу диспергування золю за допомогою обертового віброгранулятора представлена у звіті за 1 етап даної НДР [1, 2, 4]. Для дослідження впливу режимних параметрів роботи технологічного обладнання установки виробництва каталізаторів Al_2O_3 на властивості гранул необхідно провести серії фізичних експериментів. Перша серія експериментів направлена на визначення залежностей між частотою коливань, витратою ПАР (поверхнево-активних речовин), діаметром отворів корзини обертового віброгранулятора та вмістом води на діаметр гранул та насипну густина після сушіння та насипну густина після прокалювання гранул. Також в ході експериментів буде оцінено довжину нерозривного струменя золю.

В другій серії експериментів буде визначено вплив масового відношення порошку до кислоти ($Al(OH)_3:HNO_3$), частоти коливань та частоти обертання

вібраційного гранулятора на такі властивості гранул як насипна густина, міцність та монодисперсність. Методика визначення міцності та насипної густини гранул описана в [1].

Витікання струменя золя через отвір з врахуванням його нахилу та циркуляції перед отвором. При роботі промислової установки отримання каталізатору Al_2O_3 , а саме диспергатору рідини, в результаті впливу різних факторів, зокрема, перекоосу осі та нерівномірної подачі рідини, витрата рідини розрахована аналітичними способами може відрізнятись від дійсної. Тому дослідження витікання через круглі отвори при наявності додаткових факторів, таких як перекіс осі та закручування потоку може внести корективи в математичні моделі та аналітичні залежності, а, виходячи з цього, підвищити достовірність і ефективність розробленого методу.

Для визначення параметрів витікання рідини через круглі отвори в тонкій стінці, перпендикулярно розташованій до вертикальної осі, є достатня кількість рекомендацій [20, 21, 22]. Причому ці рекомендації стосуються витікання за нормальних умов підведення рідини до отвору. Для визначення параметрів витікання за наявності інших умов, таких як нахил осі отвору або наявність циркуляції потоку перед отвором, рекомендації практично відсутні.

Витрата при витіканні через отвір визначається за формулою:

$$Q = \mu F_0 \sqrt{2gH} \quad (1.1)$$

де μ – коефіцієнт витрати;

F_0 – площа отвору;

H – наявний тиск над отвором.

За наявності вільної поверхні атмосферного тиску H дорівнює висоті стовпа рідини над отвором.

Коефіцієнт витрати визначається за виразом:

$$\mu = \varphi \delta \quad (1.2)$$

де φ – коефіцієнт швидкості;

δ – коефіцієнт стискання на виході.

Величина коефіцієнта витрати залежить від багатьох факторів, так як на нього впливають всі фактори, з якими пов'язані коефіцієнт стиснення струменя δ і коефіцієнт швидкості φ . μ

Досліди над протіканням рідини через отвір у тонких стінках проводилися з водою. Коефіцієнти витрати μ для інших рідин, а також вплив температури рідини на μ майже не досліджувалися. Аналізуючи рекомендації різних авторів з цього питання, наведемо найбільш поширені рекомендації визначення коефіцієнта μ . У практичних рекомендаціях [23] пропонується приймати наступні значення μ :

При $Re < 25$ та $\varepsilon \approx 1$

$$\mu = \varphi = \frac{Re}{48} \quad (1.3)$$

При $25 < Re < 200 - 400$

$$\mu = \frac{Re}{1.5 + 1.4 Re} \quad (1.4)$$

(найбільше значення μ_{max} складає при цьому 0.69, в інших дослідження зустрічається значення $\mu_{max} = 0.72$);

При $200 - 400 < Re < 10000$

$$\mu = 0.592 + \frac{0.27}{\sqrt{Re}} \quad (1.5)$$

При $10000 < Re < 300000$

$$\mu = 0.592 + \frac{5.5}{\sqrt{Re}} \quad (1.6)$$

При $Re > 300000$ коефіцієнт витрати μ майже не змінюється і складає 0.595 або приблизно 0.6. Число Рейнольдса в даному випадку розраховується за залежністю:

$$Re = \frac{\sqrt{2gH \cdot d}}{\nu} \quad (1.7)$$

де d - діаметр отвору;

ν – кінематична в'язкість рідини.

За виразами (1.3 - 1.6) видно, що зі збільшенням в'язкості рідини коефіцієнт витрати повинен зростати. У разі неповного стиснення струменя величина коефіцієнта витрати μ_H буде більше коефіцієнта витрати μ для випадку повного стискання [22, 23]:

$$\mu_H = \mu \left(1 + c \frac{n}{x} \right) \quad (1.8)$$

де c - коефіцієнт, що враховує форму отворів, для круглих отворів рівний 0.13, для прямокутних - 0.15;

n - периметр тієї частини контуру отворів, на якій відсутні стискання;

x – периметр всього отвору.

Недосконале стиснення можна враховувати в залежності від їх співвідношення площі ω і загальної площі для Ω в якій розташований отвір:

$$\mu_H = \mu \left[1 + 0.641 \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2 \right] \quad (1.9)$$

Тому, використовуючи наявні рекомендації, здійснимо розрахунок коефіцієнтів витрати всім випадків закінчення і порівняємо з досвідченими даними. Що стосується збігу з нахилом отвіра з попередньою циркуляцією, то тут необхідно детальне дослідження цих питань як експериментально, так і теоретично.

Змійовиковий промивач гель-сфер. При дослідженні гідродинаміки процесу промивання гель-сфер у змійовиковому промивачі необхідно провести досліди, щодо вивчення залежності швидкості переміщення гель-сфер у змійовику від параметрів зазначених в таблиці 1.1. Дослідження проводяться за допомогою методу "відсічок", сутність якого полягає в наступному: в змійовик подавалися гель-сфери, що промиваються, з постійною витратою. Після виходу установки на режим і заповнення змійовика піском, проводилося відключення змійовика від системи, тобто "відсікання", після чого гель-сфери вивантажуються зі змійовика, просушуються і зважувалися.

Таблиця 1.1 – Параметри, що впливають на швидкість переміщення гель-сфер у змійовиковому промивачі.

Частота переміщення діафрагми	$\omega_{cp} = \varphi(f)$
Амплітуда переміщення діафрагми	$\omega_{cp} = \varphi(A)$
Середній діаметр змійовика	$\omega_{cp} = \varphi(D_{cp})$
Степінь заповнення змійовика	$\omega_{cp} = \varphi(K_3)$

Знаючи витрату гель-сфер та їх кількість у змійовику, можна визначити час заповнення змійовика:

$$\tau_3 = \frac{G_4}{Q_4} \quad (1.10)$$

де τ_3 – час заповнення змійовика, с;

Q_4 – масова витрата гель-сфер, що промиваються, кг/с;

G_4 – вага частинок у змійовику, кг.

Середня швидкість переміщення частинок у змійовику:

$$\omega_{\text{ср.ч}} = \frac{L}{\tau_3} \quad (1.11)$$

де $\omega_{\text{ср.ч}}$ – середня швидкість переміщення частинок у змійовику, м/с;

L – довжина труби змійовика, м.

Експериментальна установка для дослідження процесу промивання гелі-сфер наведена у підрозділі 1.3.3.

Магнітострикційний спосіб диспергування золю. При роботі на малих отворах (100 мкм і менше) велика ймовірність їх забиття домішками, а також за рахунок гелювання розчину в отворі, що можливо при досягнутих швидкостях стікання розчину з отворів (до 2,5 - 3 м/с).

Представляє великий практичний інтерес досліджувати можливість використання магнітострикційних вібраторів підвищеної частоти до ультразвукових частот з метою збільшення в 2 - 3 рази швидкості стікання гелюючого розчину. Слід припустити, що в цьому випадку вдасться істотно зменшити ймовірність забиття отворів домішками або гелі-частинками за рахунок наступних факторів:

- 1) Підвищення тиску та швидкості розчину перед отворами;
- 2) Безперервної ультразвукової (звукової) очистки отворів і руйнування гелі-частинок в випадку їх передчасного створення перед отворами стікання;
- 3) Більш інтенсивного охолодження фільтри при збільшенні у 2–3 рази швидкості розчину в отворах.

Крім того використання магнітострикційних вібраторів дозволяє зробити диспергуючий пристрій більш компактним і в кілька разів збільшити продуктивність фільтер (отворів стікання).

Як відомо вібродиспергування засноване на властивості струменя рідини, що витікає з постійною швидкістю, під впливом регулярних збурень постійної частоти розпадатися на монодисперсні краплі. Частота вібрації при цьому процесі повинна задовільняти умову [24]:

$$f = \frac{v}{(3,5 \div 7)d_{\text{стр.}}}, \quad (1.12)$$

де: $d_{\text{стр.}}$ – діаметр струменю, що піддається вібророзпаду, м.

Як видно з рівняння (1.12), зі зростанням швидкості струменю частота коливань, що збурюються, повинна зростати лінійно.

Другою необхідною умовою для монодисперсного розпаду струменя є інтенсивність збурень, яка повинна бути такою, щоб довжина суцільної частини струменя задовольняла умові:

$$\lambda \leq l \leq 3\lambda, \quad (1.13)$$

де l – довжина суцільної частини струменю (рахуючи від отвору); $\lambda = (3,5 \div 7)d_{\text{стр.}}$ – ефективна довжина струменю.

Для освоєння промислового монодиспергування рідин представляє цікавість інтенсифікація продуктивності струменя, тобто збільшення її швидкості. Це вимагає відповідного підвищення частоти збурених коливань, що обурюють. Слід зазначити, що в існуючих конструкціях електромагнітних і електродинамічних вібраторів з підвищенням частоти коливальна потужність зменшується.

На відміну від вище зазначених конструкцій вібраторів магнітострикційний вібратор при значних значеннях частоти має велику коливальну потужність. Ця властивість магнітострикційних вібраторів обумовлена поєднанням

резонуючого стрижня з магніострикційного матеріалу і катушки зі збуджуваним нею електромагнітним полем. Виходячи з конструктивних особливостей магніострикційних вібраторів, слід зазначити, що кожен вібратор працює на одній постійній частоті, яка визначається довжиною резонуючого стержня. У зв'язку з цим, застосування магніострикційних вібраторів для низьких частот (менше 10 кГц) недоцільно через великі довжини резонуючих стрижнів, так як довжина стрижня знаходиться в обернено пропорційній залежності від частоти [24]:

$$l = \frac{k}{2f} C, \quad (1.14)$$

де k – порядок гармонії;

f – частота;

C – швидкість звуку в матеріалу стрижня.

У той же час застосування магніострикційних вібраторів невеликих розмірів для диспергування струменів рідини при великих швидкостях стікання і високих частот є доцільним. Конструкції вібраційних диспергаторів з магніострикційними вібраторами будуть компактні надійні в роботі.

Однією з умов проведення процесу монодиспергування є узгодження швидкості стікання струменя з частотою вібрації. У схемі установки швидкість струменя рідини визначається тиском рідини в диспергіруді головки. Швидкість струменя рідини, що впливає з мікроотворів, не може бути розрахована за рівнянням виду:

$$V = \varphi \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad (1.15)$$

Для визначення залежності швидкості стікання струменя рідини від тиску:

$$V = f(p) \quad (1.16)$$

Будується графік на підставі даних експерименту. Тиск рідини задається з допомогою пневмопідпори та вимірюється зразковим манометром, а швидкість вимірюється об'ємним методом.

Перед проведенням випробувань попередньо розраховується діапазон робочих швидкостей струменя по формулі (1.12):

$$V_{min} = f \cdot 3,5d_{стр.} = 15000 \cdot 3,5 \cdot 160 \cdot 10^{-6} = 8,4 \text{ м/с}, \quad (1.17)$$

$$V_{max} = f \cdot 7d_{стр.} = 15000 \cdot 7 \cdot 160 \cdot 10^{-6} = 16,8 \text{ м/с}. \quad (1.18)$$

В посудині встановлюється мінімальний розрахунковий тиск. Вмикається вібратор. Спостерігаючи за розпадом отруєння, поступово збільшують тиск до максимального значення. При отриманні стійкого монодисперсного розпаду реєструють робочий діапазон тисків, за яким визначається діапазон робочих швидкостей.

При випробуванні магнітострикційного вібратора з частотою 15 кГц та фільтери з діаметром отвору 160 мкм оптимальний режим отримання монодисперсних капель виходить при $P_{min} = 0,7$ ати та $P_{max} = 0,82$ ати, що відповідає швидкостям $V_{min} = 10,2$ м/с та $V_{max} = 11,8$ м/с. У процесі випробувань регулювалася інтенсивність збурень шляхом зміни вихідної потужності генератора, яка вимірюється у відсотках за шкалою приладу. При випробуванні вдалася можливість регулювати інтенсивність випромінювання так, що довжина суцільної частини струменя відповідає $l = 3\lambda$.

Проведені випробування підтвердили принципову можливість диспергування мікроструменя рідини, що стікали з відносно великими швидкостями, за допомогою магнітострикційного вібратора високої частоти.

Встановлена також можливість накладання вібрації на корпус через шар рідини (масла), що створює переваги при розробці і конструюванні вібраційних диспергаторів.

Для здійснення монодиспергування рідин в промисловому масштабі з використанням магнітострикційних вібраторів необхідно провести дослідження методів введення швидко падаючих крапель в затверджуюче середовище, при яких запобігається їх розбиття в момент контакту з затверджуючим середовищем.

1.2 Вибір та порівняльна оцінка методів досліджень. Оцінка похибок вимірювань та адекватності результатів моделювань

Для оброблення отримуваних результатів застосовується загальноприйнятий підхід до оцінювання сумарної похибки проведення експериментальних досліджень [25, 26, 27]. Зокрема, для відносна похибка вимірюваних величин визначається за наступним виразом:

$$\delta_y = \sqrt{(\delta_{y1} + \delta_{y2})^2 + \delta_{y3}}, \quad (1.19)$$

де δ_{y1} , δ_{y2} , δ_{y3} – відповідно відносні похибки вимірювального приладу, методу вимірювання і випадкова похибка.

При цьому, похибка вимірювального приладу визначається, як правило, за половиною ціни ділення. Похибка методу вимірювання ураховує недосконалість методу дослідження. Випадкова похибка відповідає за точність повторних вимірювань і залежить від сукупності випадкових факторів. Її абсолютне значення є нормалізованим середньоквадратичним відхиленням результатів багаторазових вимірювань:

$$\delta_{y3} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (y_k - y_{av})^2}{n-1}}, \quad (1.20)$$

де y_k – значення вимірюваної величини у k -му вимірюванні ($k = 1, 2, \dots, n$);

n – кількість повторів вимірювання величини;

y_{av} – середнє значення вимірюваної величини за серією n повторюваних вимірювань:

$$y_{av} = \frac{\sum_{k=1}^n y_k}{n} \quad (1.21)$$

Для визначення відносної похибки δ_y розрахунку комплексної величини y , яка функціонально залежить від сукупності вимірюваних величин x_i ($i = 1, 2, \dots, m$) загальною кількістю m , застосовується наступна формула:

$$\delta_y = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\psi_i \delta_{x_i})^2} \quad (1.22)$$

де δ_{x_i} – відносна похибка вимірювання величини x_i ; ψ_i – вагові функції:

$$\psi_i(x_1, x_2, \dots, x_m) = \frac{x_i}{y} \frac{\partial y}{\partial x_i}. \quad (1.23)$$

Для перевірки відповідності теорії з експериментальними даними застосовується порівняння двох незалежних похибок за критерієм Фішера:

$$F = \frac{D_1}{D_2}, \quad (1.24)$$

де D_1 , D_2 – відповідно залишкова дисперсія і дисперсія повторюваності математичних очікувань:

$$D_1 = \frac{1}{p-l} \sum_{j=1}^p (y_j - y_j^{av})^2; D_2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i^e - y_{av})^2, \quad (1.25)$$

де p – кількість груп параметрів;

l – кількість параметрів теоретичної залежності;

n – кількість експериментальних точок;

y_j, y_i^e – відповідно теоретичні та експериментальні значення вимірюваної величини;

y_{av}, y_j^{av} – середні значення у групі вимірюваних величин.

1.3 Опис експериментальних установок. Заходи з модернізації дослідного стенду

1.3.1 Експериментально-дослідна установка для отримання гранул каталізатора Al_2O_3 за золь-гель технологією

Експериментально-дослідна установка для виробництва кулькового носія каталізатора має наступні технічні характеристики: продуктивність по готовому продукту (Al_2O_3) до 50 кг/год, розмір гранул носія каталізатора - $(1,2 \div 2,8) \pm 0,2$ мм, та може змінюватись в даному діапазоні в залежності від режимних параметрів роботи установки.

Технологічний процес отримання кулькового носія каталізатора складається з наступних стадій, зображених на рисунку 1.1.

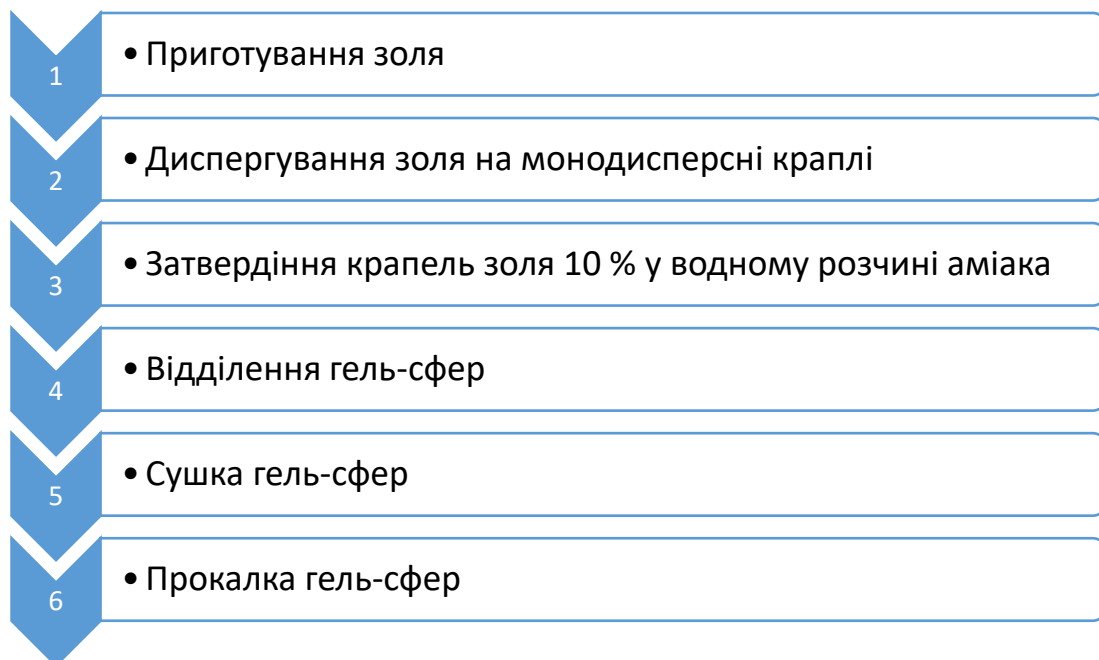


Рисунок 1.1 – Стадії процесу отримання каталізатору Al_2O_3

Установка отримання кулькоподібних носіїв каталізатору (рисунок 1.2) працює наступним чином. Порошкоподібний $AlOON$ з бункера поз. E201 ваговим дозатором поз.Д.301 подається в змішувач поз.С101. Сюди ж в змішувач поз. С101 з ємності поз. E202 насосом-дозатором поз. Д302 надходить вода і з ємності поз.Е203 насосом-дозатором поз. Д304 надходить 65 % водний р-н азотної кислоти. В змішувачі поз. С101 відбувається усереднення даних компонентів з отриманням золю.

Для запобігання залягання продукту на бункері поз. E201 встановлений вібратор періодичної дії. З змішувача поз. С101 насосом-дозатором поз. Д303 отриманий золь подається через систему фільтрів в диспергатор поз. Д102. Насос-дозатор поз. Д303 забезпечує необхідну витрату золя, який подається на диспергатор (≈ 256 кг/ч) і накладає пульсації тиску на потік золя для отримання монодисперсних крапель. Струмені золя, стікаючи з отворів диспергатора поз. Д102, розпадаються на монодисперсні краплі в об'ємі колони поз. К103. Потрапляючи в 10 % водний розчинн аміаку, що знаходиться в колонне поз. К103, краплі тверднуть. Для поліпшення якісних характеристик гель-сфер в колонне поз. К103 передбачена подача ПАР і гасу. Отримані в колоні, гель-сфери через перелив разом с озчином аміаку надходять в відділювач поз. О104, де відбувається їх відділення від розчину аміаку. Слід зазначити, що в якості відділювача запропоновано використовувати пульсаційний змійовиковий промивач (підрозділ 1.3.3). З відділювача поз. О104 гель-сфери надходять в сушилку поз. С105. Сушка гель-сфер проводиться повітрям, підігрітим до температури 200 - 350 °С. Висушені гель-сфери з сушилки поз. С105 надходять в піч прокалки поз. П106.

Повітря в сушилку поз. С105 подається вентилятором поз. В109. Нагрівання повітря здійснюється в трубчастих теплообмінниках поз. Т107, Т108. Для нагрівання повітря в теплообміннику поз. Т107 використовується відведене повітря з сушилки поз. С105, а в теплообміннику поз. Т108 в якості теплоносія використовується перегрітий пар. Очищення газів, що утворюються при роботі установки, може здійснюватися як в системі газоочистки діючого виробництва,

так і, на вимогу замовника, в автономній ділянці газоочистки, якій може входити в комплект установки.

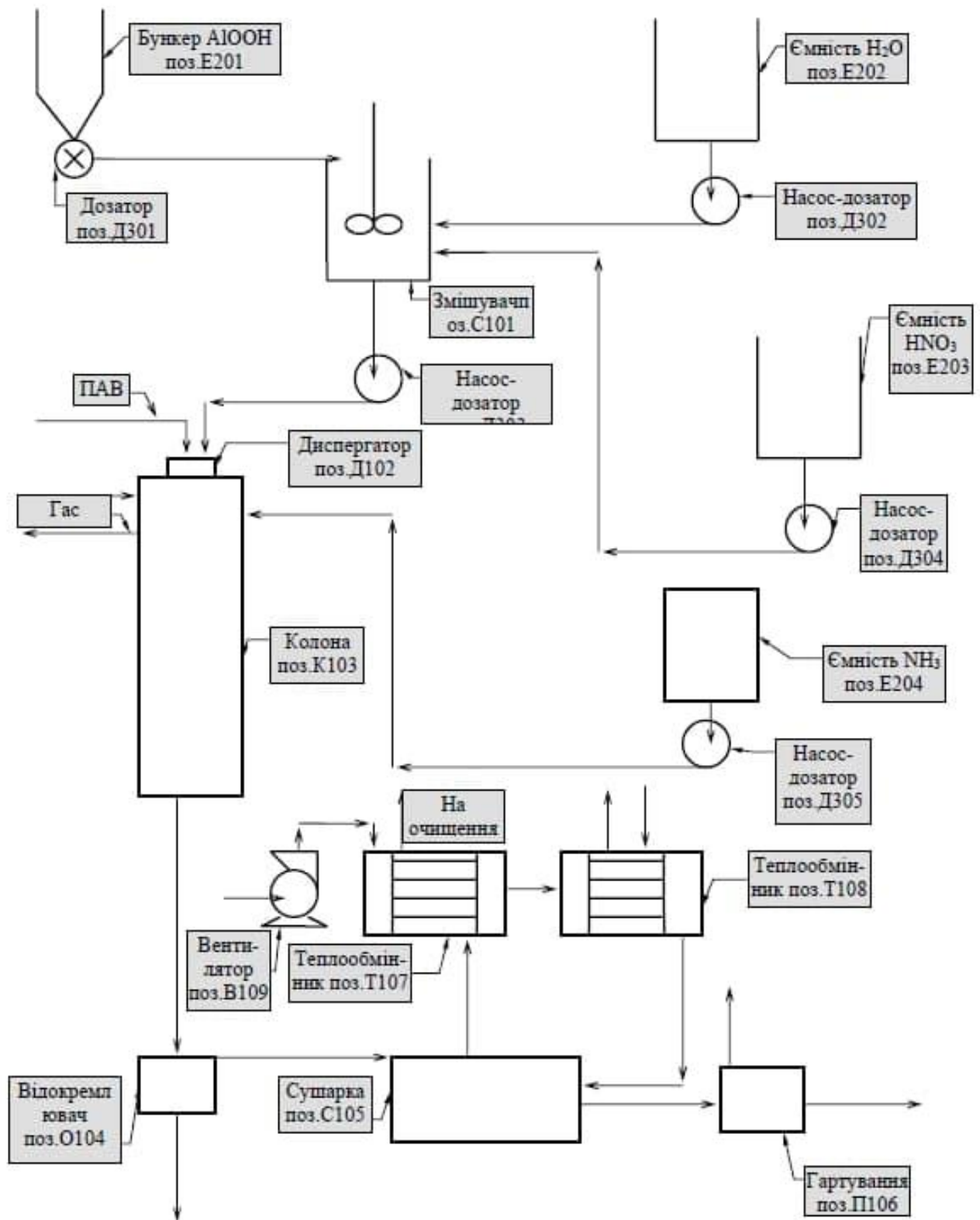


Рисунок 1.2 – Принципова технологічна схема експериментально-дослідної установки для виробництва кулькового носія каталізатора

1.3.2 Випробувальна установка для дослідження витікання через отвір при стисканні струменя з урахуванням нахилу отвору та циркуляції перед отвором

Для досліджування поставлених питань були спроектована та виготовлені спеціальні експериментальні установки (рисунки 1.3 та 1.4). Установка, предствалена на рисунку 1.3, дозволяє досліджувати витікання струменю з нахилом та без нахилу отвору. Нахил на певний кут досягається шляхом повертання або вивертання гвинта, розташованого в ніжці штативу.

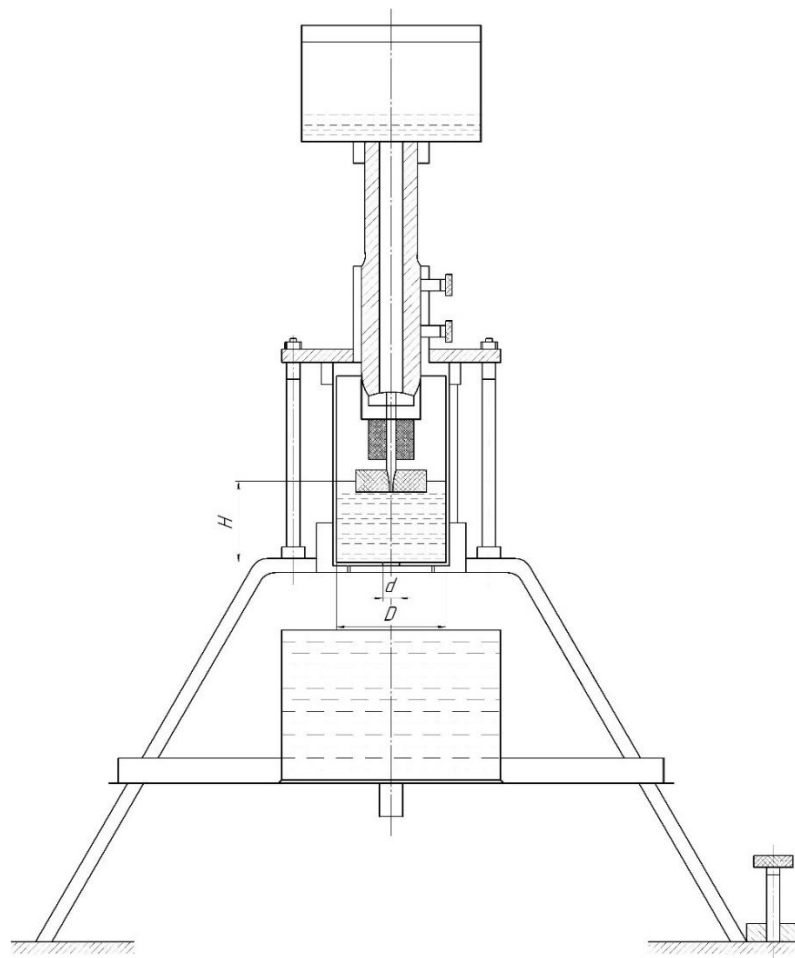


Рисунок 1.3 – Установка для дослідження витікання струменя з врахуванням нахилу отвору

Зміна діаметру отворів вироблялася шляхом заміни стаканів. Постійний рівень у стакані підтримувався за рахунок спеціального пристрою "клапан-поплавок". Поплавок слідував за рівнем, і, будучи жорстко з'єднаним з клапаном, автоматично пвдтримував рівень у стакані постійним протягом всього

часу випробувань. Зміна рівня води в стакані відбувалася шляхом підняття або опускання штанги разом із стежачим пристроєм.

Для дослідження впливу циркуляції на стікання експериментальна установка приведена на рисунок 2.4. Ця установка збиралася на базі установки I з тією зміною, що мала спеціальний стакан с 20-ма рівномірно розподіленими по висоті соплами. Сопла виходили в стакан по дотичній, що давало можливість забезпечити певну циркуляцію в стакані. Для цього було необхідним подавати через сопла певну кількість рідини q під визначеним тиском (розрахунок q та p див. підрозділ 1.1).

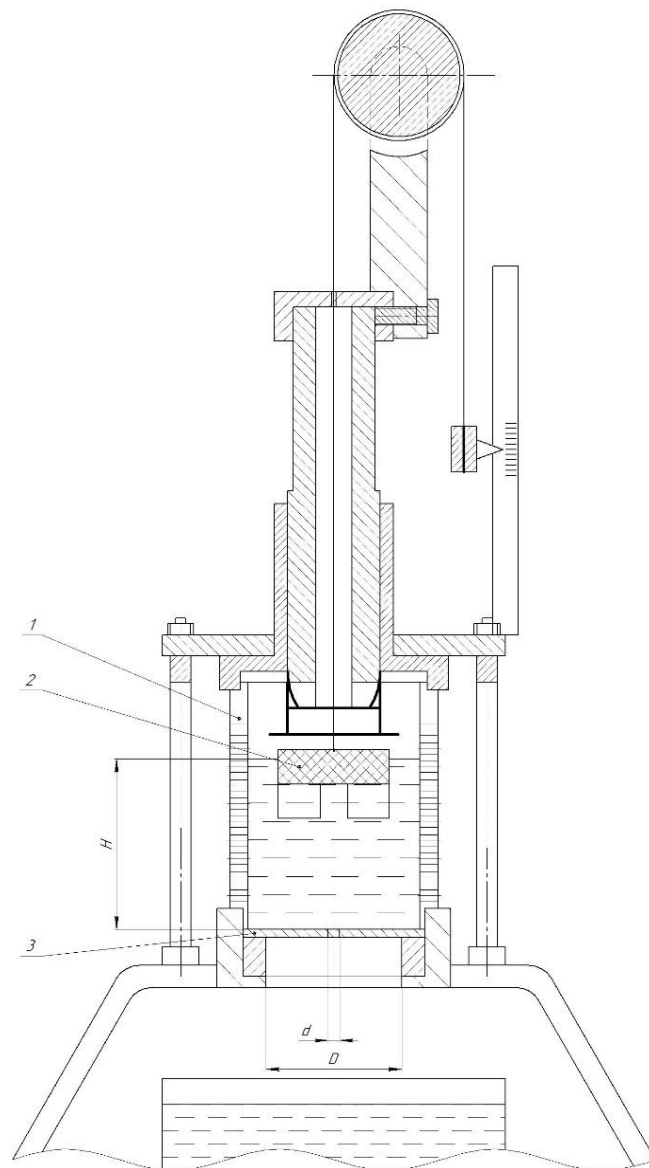


Рисунок 1.4 – Установка для дослідження витікання струменя з врахуванням циркуляції перед отвором

Тиск в колекторі (а, відповідно і тиск в соплах) контролювався з допомогою п'єзометра. Це дозволяло точно виставити потрібний тиск. Зміна тиску в колекторі вироблялася шляхом дроселювання води, що виходить на слив з колектору. Діаметри отворів змінювались за рахунок заміни денців.

Слід зазначити, що при проектуванні установки, спочатку передбачалося змінювати циркуляцію з допомогою вертушки і стробоскопу. Однак, як показував досвід, обидва ці способи не дозволяють визначити значення циркуляції по наступним причинам.

При постійній циркуляції в стакані ($\Gamma = const$) шари рідини на різних радіусах рухаються з різною окружною швидкістю, епюру якої вздовж радіусу можна представити у вигляді гіперболічного закону:

$$V_u = \frac{\Gamma}{2\pi r} \quad (1.26)$$

Відповідно, вертушка, що поміщенна в рідину буде показувати незрозуміло яку кутову швидкість.

Умову існування вихору можна представити в вигляді

$$\frac{V_{uB}^2}{2g} = Z, \quad (1.27)$$

де: Z – відстань від вільної поверхні до розглядаємого перерізу вихору;

V_{uB} – окружна швидкість на поверхні вихору в розглядаємому перерізу вихору.

Тобто питома кінетична енергія на поверхні вихору зрівнюється до потенціальної енергії положення.

Враховуючи залежність (1.27) видно, що окружна швидкість залежить від глибини занурення Z розглядаємого перерізу. Проте так, як по I теоремі Гельмгольца напруженість вихрової трубки не змінюється по її довжині, а по теоремі Стокса напруженість вихрової трубки рівна циркуляції, відповідно, для

будь-якого перерізу вихрової трубки $\Gamma = const$. Щоб здійснювалась умова $\Gamma = const$ при $V_{uB} = f(Z)$, відповідно, радіус вихрової трубки повинен залежати від Z .

Тому вихрова трубка має лійкоподібну форму, а перерізи вихрової трубки немов би ковзають один відносно іншого. Чим менше Z , тим більший радіус і менше V_{uB} . Ця обставина затруднює спостереження вихору з допомогою стробоскопу так як, з допомогою останнього, можна "зупинити", лише один переріз, інші не будуть обертатися.

Крім того для визначення циркуляції не достатньо лише "зупинити" переріз потрібно ще визначити його діаметр, що з допомогою стробоскопу здійснити не являється можливим. Тому для визначення циркуляції в стакані з достатньою точністю можна користуватися передбаченим в дані роботі методами (див. підрозділ 1.1).

1.3.3 Змійовиковий промивач установки отримання кулькового носія каталізатору

Пульсаційний змійовиковий промивач призначений для безперерного дифузійного відмивання гель-сфер розчином аміаку. Пульсаційний змійовиковий промивач (рисунок 1.5) складається з вузла введення гель-сфер 1, змійовика 5, вузла виведення гель-сфер 6.

До вузла виведення приєднаний пульсатор 8 і патрубок введення для промиваючої рідини (розчину аміаку). Розчин аміаку надходить до напірного бака 10, злиття відпрацьованого (забрудненого) розчину аміаку проводиться через переливний пристрій вузла введення гель-сфер 1. До вузла виведення також приєднаний збірник промитих гель-сфер 7. Пульсатор приводиться в дію за допомогою приводу пульсатора 9.

Пульсаційний змійовиковий промивач гель-сфер працює наступним чином. Гель-сфери через вузел введення надходять у змійовик. Туди ж через вузол виведення гель-сфер надходить розчин аміаку. Рух гель-сфер та розчину аміаку

протиточний. Переміщення гель-сфер у змійовику здійснюється за рахунок гідравлічних імпульсів, що створюються пульсатором. Характер гідравлічних імпульсів такий, що при прямому русі (тобто вгору) розчину аміаку в змійовику швидкість його менша за швидкість винесення гель-сфер, і гель-сфери залишаються на місці, а при зворотному русі розчину аміаку швидкість його більша за швидкість винесення, та гель-сфери переміщуються на деяку відстань. Так, як гідравлічні імпульси подаються безперервно, то і переміщення гель-сфер у змійовику безперервно.

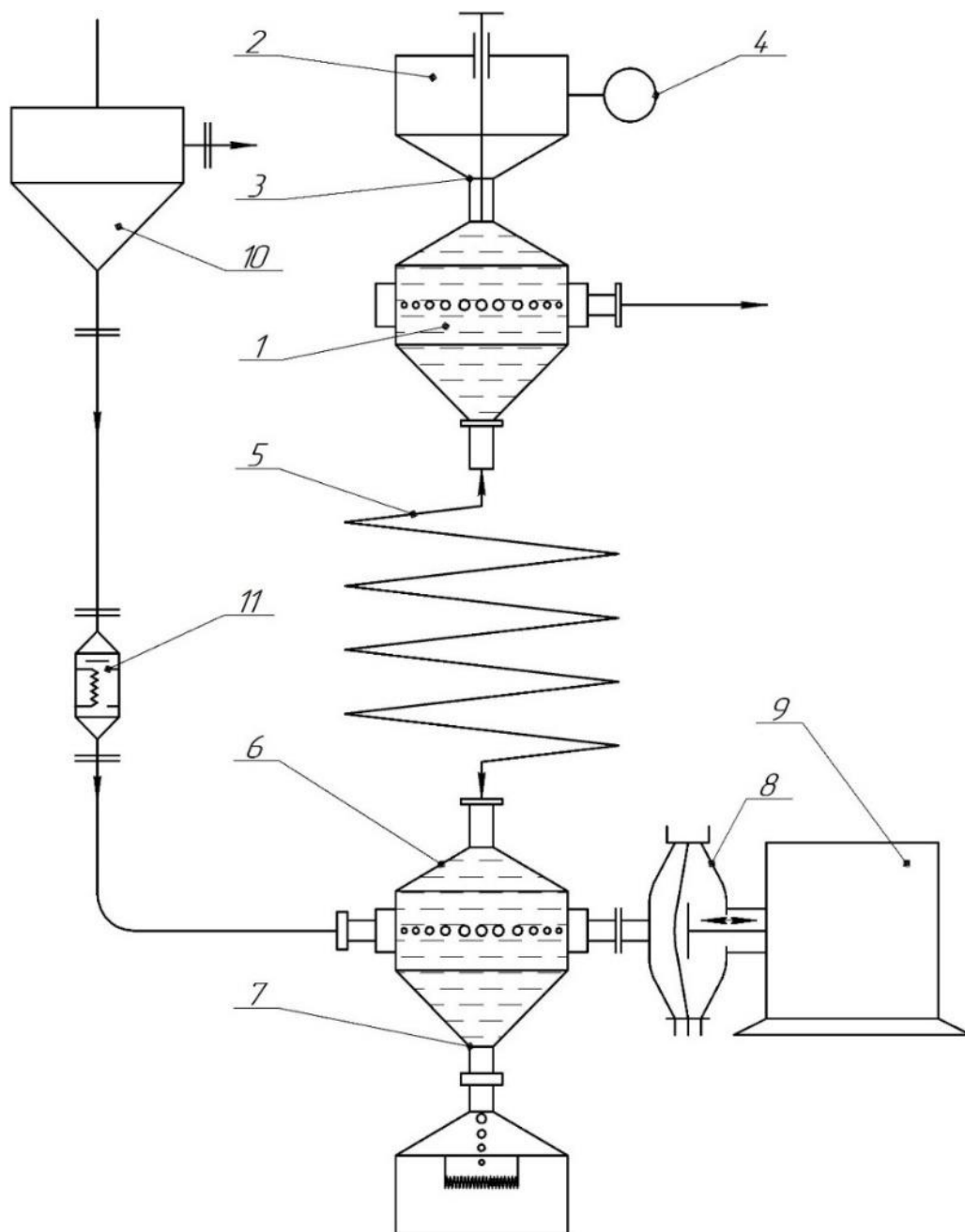


Рисунок 1.5 - Пульсаційний змійовиковий промивач гель-сфер

Величина переміщення гель-сфер за один хід пульсатора визначається по формулі:

$$l = k \cdot \frac{D^2}{d_{\text{вн.}}^2}, \quad (1.28)$$

де l – величина переміщення гель-сфер за один хід пульсатора;

D – ефективний діаметр діафрагми пульсатора;

$d_{\text{вн.}}$ – внутрішній діаметр труби зміювика;

k – коефіцієнт, враховуючий сили інерції рідини, гранул, вплив прикордонного шару рідини і т.д.

Середня швидкість переміщення гель-сфер в зміювику визначається за рівнянням:

$$\omega_{\text{ср.г.}} = fl, \quad (1.29)$$

де $\omega_{\text{ср.г.}}$ – середня швидкість переміщення гель-сфер в зміювику;

f – частота гідроімпульсів, що подаються.

Виходячи з рівнянь (1.28, 1.29), середня швидкість переміщення гель-сфер залежить від частоти гідроімпульсів і геометричних характеристик пульсатора і зміювика. Отже, змінюючи ці параметри, можна регулювати час промивання гель-сфер.

На даній установці застосований діафрагмовий пульсатор з пневматичним приводом (рисунок 1.6), що виключає можливість витіку промиваючого середовища і забезпечує просте регулювання швидкості переміщення гель-сфер.

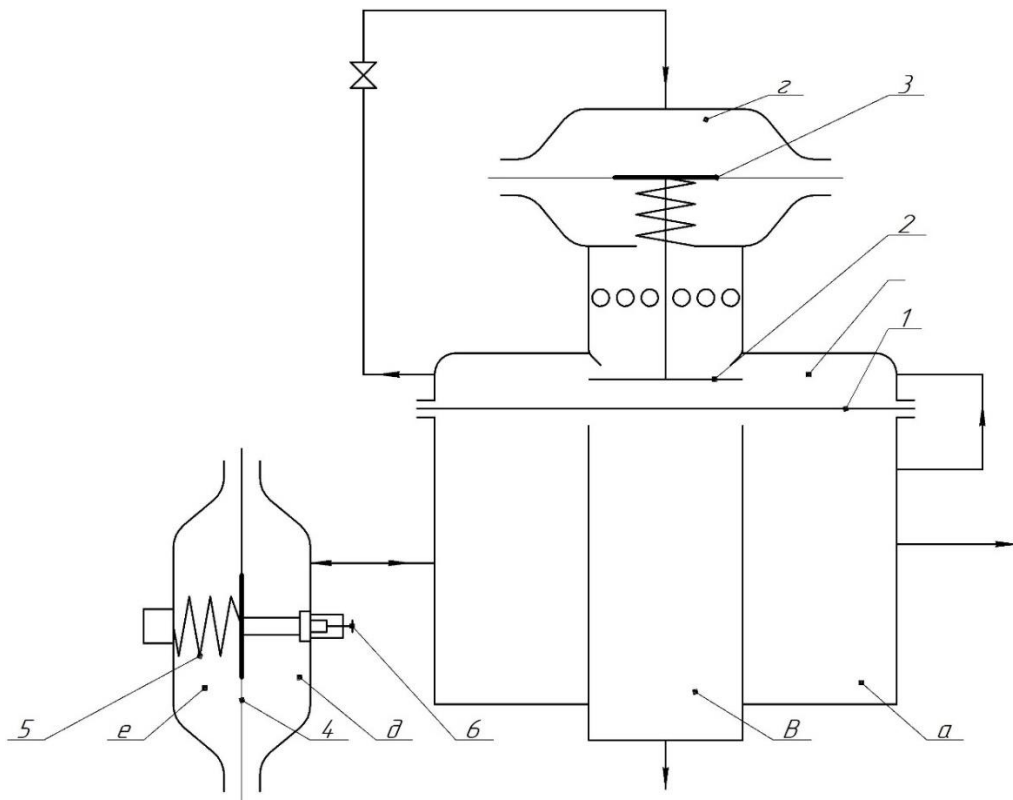


Рисунок 1.6 - Генератор пневматичних імпульсів

Діафрагмовий пульсатор представляє собою камеру розділену гнучкою діафрагмою 4 (рисунок 1.6) на дві порожнини – «е» та «д». Порожнина «е» через патрубків «ж» з'єднується з вузлом виведення гель-сфер промивача, порожнина «д» з'єднується з генератором пневматичних імпульсів. Гвинт 6 служить для зміни амплітуди переміщення діафрагми пульсатора, пружина 5 – для повернення діафрагми в початкове положення.

Генератор пневматичних імпульсів являє собою посуд, розділений гнучкою діафрагмою 1 на дві порожнини – «а» і «б» з'єднані між собою трубопроводом. При подачі повітря в порожнину «а» тиск у порожнинах «а» і «б» зростатиме, проте, так, як порожнина «а» контактує з атмосферою через вихлопну трубу "в", то площа, на яку діє тиск, буде більшою з боку порожнини «б», в результаті чого діафрагма 1 прогнеться у бік порожнини «а» і закрий вихлопну трубу. Тиск у порожнинах «а» та «б» зростатиме до тих пір, поки не відкриється клапан 2, що з'єднує порожнину «б» з атмосферою; тиск у порожнині «б» різко впаде, і

діафрагма 1 під дією тиску в порожнині «а» прогнеться у бік порожнини «б», відкриваючи вихід повітря з порожнини «а» через вихлопну трубу в атмосферу.

Частоту відкривання клапану 2 (частоту пневматичних пульсів) можна змінювати, змінюючи витрату повітря, що надходить в камеру «г».

Після скидання повітря тиск в порожнинах «а», «б» і камері «г» падає, клапан 2 під дією пружини закривається, і процес повторюється знову.

Порожнина «а» з'єднана з порожниною пульсатора «д». При збільшенні тиску в порожнинах «а» і «д» діафрагма прогинається в сторону порожнини «е», стискаючи пружину 5. При скиданні тиску діафрагма 4 під дією пружини 5 займає початкове положення.

Так як тиск в порожнинах «а» та «д» зростає повільно, в вихлоп трапляється за короткий проміжок часу, то і швидкість переміщення діафрагми 4 в прямому та зворотному напрямку буде різною, що забезпечує різну швидкість руху промиваючої рідини в змішувачу в прямому та зворотному напрямку.

1.3.4 Випробувальна установка магніострикційного диспергування рідини (золю)

Магніострикційний спосіб диспергування рідини реалізується на лабораторній установці (рисунки 1.7, 1.8). Як модельну рідину обрано дистильовану воду. Основним вузлом установки є диспергуюча головка 1, яка представляє собою циліндричну камеру, розділену перегородкою. У нижній частині камери встановлена фільтр 2 з мікроотвором діаметром 160 мкм, а в бічній стінці передбачений штуцер 3 для подачі рідини. Верхня частина камери заповнена вазеліновим маслом, в котре занурена випромінююча частина магніострикційного вібратора 4. Установка зібрана на лабораторному штативі так, що над диспергуючою головкою 1 встановлений магніострикційний вібратор 4, яка живиться від електронного генератора 5. Подача рідини в диспергуючу головку здійснюється з посудини 6, забезпеченої системою пневмопідпірки 7. Струмінь рідини витікає в посудину-збірник 8. Для

спостереження процесу розпаду струменя на мікрокраплі у стробоскопічному світлі на штативі закріплений стробоскоп.

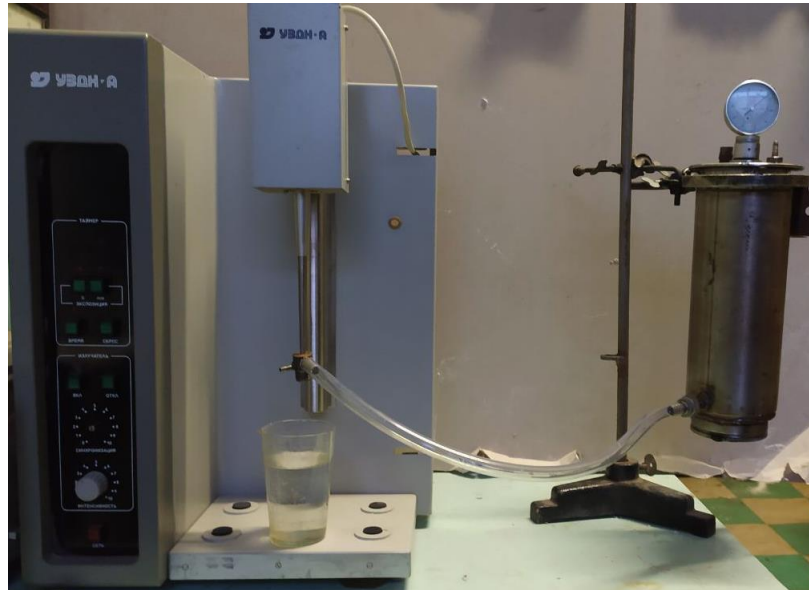


Рисунок 1.7 – Установки для дослідження магнітострикційного способу диспергування рідини

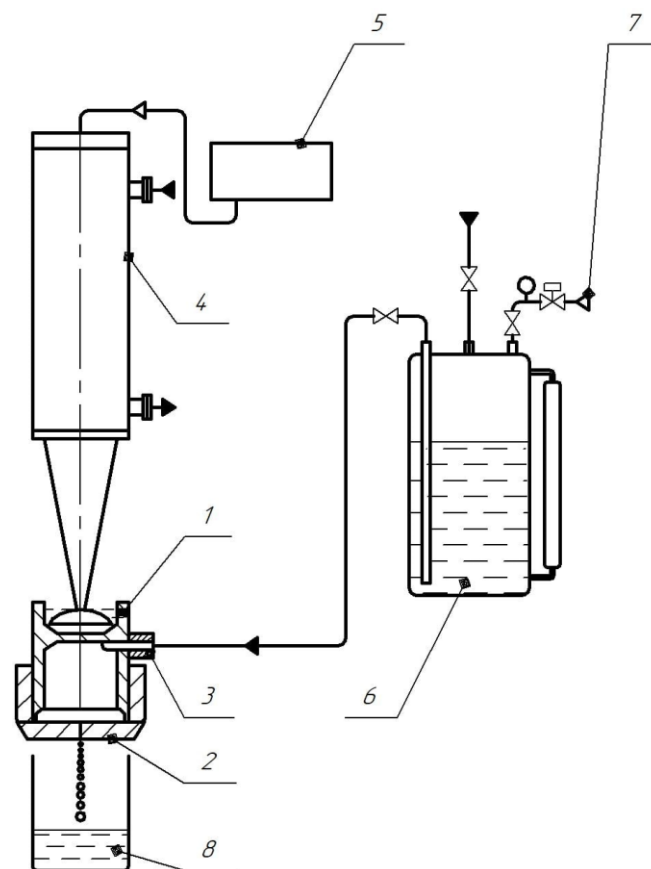


Рисунок 1.8 – Принципова схема установка для дослідження магнітострикційного способу диспергування рідини

1.4 Висновки до розділу 1

Наведена методика проведення фізичних експериментів процесу дисергування рідини (золю), яка дозволить оцінити вплив гідродинамічних показників та конструктивних параметрів обладнання на фізико-механічні властивості отримуваних гранул каталізатора Al_2O_3 . З метою підтвердження результатів експериментальних досліджень розглянуті питання оцінки похибок вимірювань та адекватності результатів моделювань.

Для проведення експериментальних досліджень розроблена установка для отримання каталізатору Al_2O_3 , та запропонована конструкція пульсаційного змійовикового промивача гель-сфер.

Розроблено диспергуючий пристрій з магніострикційним вібратором, що дозволить отримувати монодисперсні краплини при швидкості витікання рідини до 7,5 м/с при частоті коливань 15 кГц та 22 кГц. Даний пристрій дозволить підвищити продуктивність диспергуючого пристрою та надійність його роботи.

Розроблені установки, та відповідні методики, для проведення експериментальних досліджень впливу таких факторів як нахил отвору, нерівномірність подачі рідини та циркуляція перед отвором на витрату рідини через отвір.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВІБРОГРАНУЛЯЦІЇ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ЗОЛЬ-ГЕЛЬНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ

2.1 Математичне моделювання гідромеханічних процесів під час руху краплин золю від диспергатора до контакту з розчином аміаку

Одними із найважливіших властивостей каталізаторів двоокисує питома поверхня гранул та загальний обсяг пор. Досягнення високих значень даних показників можливо за рахунок інтенсифікації масообмінних процесів шляхом створення розвинутої міжфазної поверхні під час диспергування рідини (золю), осідання дисперсних часток у вільному газовому просторі, та подальшого осідання і затвердіння.

Для отримання розвинутої міжфазної поверхні також може використовуватися вихровий рух газової і крапельної рідини. При цьому потік газу має істотний градієнт окружної швидкості [28]. Слід зазначити, що різниця швидкостей на поверхні краплі, під час її вільного падіння у газовому просторі, призводить до зсуву у додатку результуючих аеродинамічних сил, що діють на краплю. З іншого боку, рух зовнішніх шарів краплі призводить до внутрішньої циркуляції та прискорення масообміну. З цього погляду важливо визначити взаємозв'язок між градієнтом швидкості газового потоку та інтенсивністю внутрішньої циркуляції у краплі.

Більш того, ефект градієнта швидкості на інтенсифікацію внутрішньо циркулюючого потоку в рідкій крапельці дозволить розробити новий метод передачі маси на основі контрструмового вихрового потоку. Даний метод спрямований на розробку нових конструкцій високоефективних масообмінних та грануляційних апаратів, в яких вихровий потік фаз здійснюється у всьому вільному об'ємі апарату.

Проблема взаємодії газового потоку з рідкими краплями досі не досліджена ретельно. Однією з перших робіт, присвячених вивченню циркуляційних потоків в крапельці, представлена [29], при цьому в даній роботі не розглядається

градієнт швидкості. В раніше зазначеній роботі [28] автори довели можливість посилення внутрішніх потоків в крапельі під градієнтом швидкості. Однак для ретельного теоретичного обґрунтування цієї можливості необхідно застосувати сучасні підходи для теоретичного аналізу нелінійної гідродинамічної системи та її стабільності руху.

В роботі [30] розробили математичну модель руху полідисперсного аерозолі в турбулентному газорідному потоці. В результаті було показано, що сили інерції викликають розподіл розмірів аерозольних частинок. Цей результат може бути використаний для подальшого опису утворення краплин рідини, їх динаміки та стабільності. У статті [31] досліджено гідродинаміку газорідних сумішей в каналі інерційо-фільтруючого сепаратора для забезпечення надійності технологій тонкого очищення.

В статті [32] науковці описали загальний механізм руху дисперсної фази під дією газового потоку у вихрових апаратах. В результаті був запропонований детермінований підхід до аналізу активних сил, що діють на падаючі краплини в закрученому потоці газу. Цей підхід включає в себе врахування сил інерції та опору.

В роботі [33] чисельно досліджували рух крапель під місцевим повітряним потоком. В результаті було отримано, що вплив кількості крапель на стабільність чисельних результатів моделювання залежить від концентрації крапельної рідини, схеми організації повітряного потоку, а також ефекту масштабу [34]. У роботі [35] вивчалися деформації, кінематика та динамічна стабільність руху крапель у мікрофлюїдах. В результаті були запропоновані залежності для оцінки форми і стабільності крапель.

Багатофазні ефекти в динамічних системах під дією накладених коливань були описані в роботі [36]. Було вивчено вплив сили Б'єркнеса на міграційний рух. В роботі [37] запропоновано схему двосторонньої взаємодії для моделювання впливу обертання частинок на реологічні властивості суспензії. В результаті з'ясувалося, що напруга зсуву стінки збільшується при збільшенні площі поверхні частинки. Нарешті, перспективні шляхи використання різних

гідродинамічних режимів підвищення ефективності технологій підготовки до робочих рідин були вивчені [38].

Наступні дослідницькі прогалини в гідродинаміці та стабільності рідких крапель у газовому потоці були заявлені через критичний огляд вищезазначених підходів. Тому актуальною задачею є обґрунтування можливості інтенсифікації процесів масообміну шляхом збільшення градієнта швидкості, що вимагає додаткового теоретичного обґрунтування. Розгляд нелінійного розподілу градієнта швидкості по радіусу крапельки не повністю описані. Слід чітко вивчити вплив внутрішніх циркуляційних потоків в крапельці на стабільність її руху в вихровому газовому потоці.

Кінематика краплини в газовому потоці. Розглянуто вплив потоку газу на рідку крапельку. Для розробки математичної моделі використовуються як полярна система координат з джерелом в точці O , так і сферична система координат з джерелом мас-центру (рисунок 2.1).

Під час математичного моделювання були обрані наступні спрощені припущення. По-перше, рідка крапелька відносно невелика. Це припущення дозволяє розглядати сферичну форму крапельки і не розглядати вторинний розпад. Коефіцієнт опору також можна визначити як для твердого тіла зі сферичною формою [39]. Відстань між крапельками значно перевищує діаметр. Це припущення дає можливість нехтувати як взаємним впливом крапель, так і їх згортанням. Нарешті, крапелька рухається перекладно. При цьому запропонована математична модель дає можливість вивчити розподіл окружної швидкості радіусом крапельки і визначити швидкість мас-центру і кутову швидкість її обертання в газовому потоці.

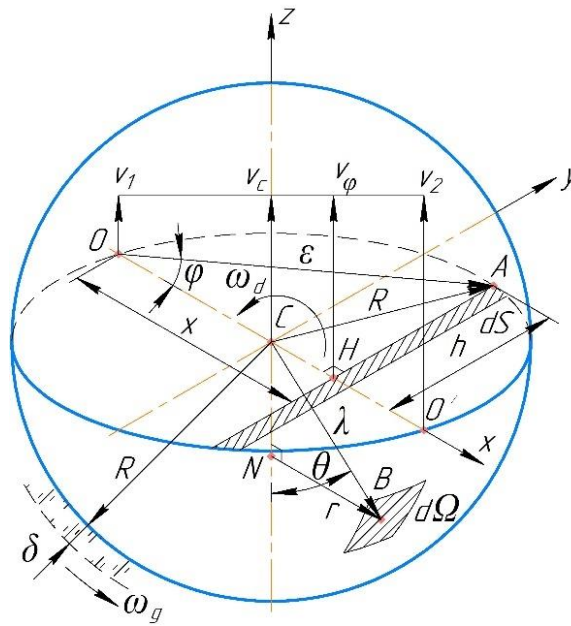


Рисунок 2.1 - Розрахункова схема руху частинки

У загальному випадку нелінійного розподілу окружної швидкості разом з радіусом крапель, ряд Макларін [40] може бути застосований щодо координати x :

$$v_{\varphi} = \sum_{k=0}^{\infty} a_k x^k, \quad (2.1)$$

де x – радіальна координата;

k – індекс;

a_k – невідомий коефіцієнт, який слід оцінювати за допомогою наступних кінематичних граничних умов $v_{\varphi}(0) = v_1$, та $v_{\varphi}(2R) = v_2$, які містять граничні швидкості v_1 and v_2 .

З огляду на умову (2.2), невідомі коефіцієнти a_0 і a_1 повинні визначатися наступним чином:

$$a_0 = v_1; a_1 = \frac{v_2 - v_1}{2R} - \sum_{k=2}^{\infty} (2R)^{k-1} a_k. \quad (2.2)$$

Граничні швидкості v_1 та v_2 визначаються наступним чином:

$$v_{1,2} = v_c \mp \omega_d R, \quad (2.3)$$

де v_c – швидкість центру мас, м/с;

$\omega_d = \frac{v_2 - v_1}{2R}$ – кутова швидкість краплини, рад/с;

R – радіус краплі, м.

Розглядаючи вирази (2.2) і (2.3), розподіл окружної швидкості разом з радіусом крапель (2.1) визначається наступним чином:

$$v_\varphi = v_1 + \omega_d x + \sum_{k=2}^{\infty} a_k x^k. \quad (2.4)$$

Слід зазначити, що інші коефіцієнти a_2, a_3, \dots визначають нелінійні особливості розподілу швидкості в крапельці.

Зовнішні сили і моменти, що діють на крапельку. Наступні рівняння визначають силу опору та її момент [41], при взаємодії газового потоку та дисерсної краплини:

$$\begin{aligned} F_d &= - \int_{(S)} \frac{\psi \rho_g (v_r^2 + v_\varphi^2)}{2} dS = 8\psi \rho_g R^2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [v_r^2 + \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} (2R)^k a_k a_n x^{k+n}] \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi d\varphi; \\ M_d &= - \int_{(S)} \frac{\psi \rho_g (v_r^2 + v_\varphi^2)}{2} dS = 16\psi \rho_g R^3 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [v_r^2 + \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} (2R)^k a_k a_n x^{k+n}] \cos^4 \varphi \sin^2 \varphi d\varphi, \end{aligned} \quad (2.5)$$

де ρ_g – густина газу, кг/м³;

v_r – радіальна швидкість, м/с;

ψ – безрозмірний коефіцієнт опору, який можна прийняти як сталу;

S – поперечний переріз краплі, диференціал якого визначається як наступна нескінченно мала площа (рисунок 2.1):

$$\begin{aligned} dS &= 2h \cdot dx = 2 \cdot \varepsilon \sin \varphi \cdot dx = 2 \cdot 2R \cos \varphi \cdot \sin \varphi \cdot dx = \\ &= 4R \cos \varphi \sin \varphi \cdot d(\varepsilon \cos \varphi) = 4R \cos \varphi \sin \varphi \cdot d(2R \cos \varphi \cdot \cos \varphi) = \\ &= 8R^2 \cos \varphi \sin \varphi \cdot d(\cos^2 \varphi) = -16R^2 \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi d\varphi. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Підстановка виразів (4) та (6) у залежність (5) дозволяє визначити

$$\begin{aligned} F_d &= \pi\psi\rho_g R^2 [a_0^2 + 2Ra_0a_1 + \frac{5}{4}R^2a_1^2 + \delta f_d(v_r, \{a_2, a_3, \dots\})]; \\ M_d &= \frac{1}{2}\pi\psi\rho_g R^3 [a_0^2 + \frac{5}{2}Ra_0a_1 + \frac{7}{4}R^2a_1^2 + \delta m_d(v_r, \{a_2, a_3, \dots\})], \end{aligned} \quad (2.7)$$

де $\delta f_d, \delta m_d$ – додаткові складові, обумовлені як нелінійністю розподілу швидкості по радіусу краплі, так і впливом радіального розподілу швидкості.

Коефіцієнти в обох залежностях (2.7) для сили опору та її моменту суттєво уточняють формули отримані в роботі [28, 42] $a_1^2, \delta f_d$ та $a_0a_1, \delta m_d$, відповідно. У випадку коли середня швидкість v_r не залежить істотно від координати φ , додаткові компоненти у виразах (2.7) набувають наступного вигляду:

$$\begin{aligned} \delta f_d &= v_r^2 + 16 \sum_{k=2}^{\infty} (2R)^k [a_0(i_{k+1} - i_k) + 2Ra_1(i_{k+2} - i_{k+1})]a_k + \\ &\quad + 8 \sum_{k=2}^{\infty} \sum_{n=2}^{\infty} (2R)^k (i_{k+n+1} - i_{k+n})a_k a_n \\ \delta m_d &= v_r^2 + 32 \sum_{k=2}^{\infty} (2R)^k [a_0(i_{k+2} - i_{k+1}) + 2Ra_1(i_{k+3} - i_{k+2})]a_k +, \\ &\quad + 16 \sum_{k=2}^{\infty} \sum_{n=2}^{\infty} (2R)^k (i_{k+n+2} - i_{k+n+1})a_k a_n, \end{aligned} \quad (2.8)$$

де введено наступний допоміжний інтеграл:

$$i_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^{2k} \varphi d\varphi. \quad (2.9)$$

У першому наближенні не можна враховувати нелінійні особливості розподілу швидкості за радіусом краплі [42]. При такому припущенні додатковими компонентами більшого порядку малості у виразах (2.7) слід знехтувати $\delta f_d = \delta m_d = v_r^2$.

При обертальному русі краплі напруга зсуву на поверхні визначається формулою Ньютона [43]:

$$\begin{aligned}\tau &= \mu_g \frac{d(\omega_d \cdot r)}{d\lambda} = \mu_g \frac{d(\omega_d \cdot \lambda \sin\theta)}{d\lambda} = \mu_g \left[\omega_d \frac{d(\lambda \sin\theta)}{d\lambda} + \lambda \sin\theta \frac{d\omega_d}{d\lambda} \right] = \\ &= \mu_g \left[\omega_d (\sin\theta + \lambda \cos\theta \frac{d\theta}{d\lambda}) + \lambda \sin\theta \frac{d\omega_d}{d\lambda} \right],\end{aligned}\quad (2.10)$$

де μ_g – динамічна в'язкість газу, Па·с;

r – радіус обертання, м;

λ – нормальна координата, м (рисунок 2.1).

Враховуючи пограничний шар [44] на поверхні краплини ($\lambda = R$) товщиною δ , можна розглядати наступні припущення. По-перше, кутова швидкість у пограничному шарі змінюється несуттєво: $\omega_d \approx \omega_g$, де ω_g – кутова швидкість газового потоку. По-друге, нормальний градієнт $\frac{d\theta}{d\lambda}$ несуттєво змінюється поблизу поверхні краплі $\left(\frac{d\theta}{d\lambda}\right)_s$. Згадані вище аналітично можна записати наступним чином:

$$\frac{d\omega_d}{d\lambda} = \frac{\omega_d - \omega_g}{\delta}; \frac{d\theta}{d\lambda} = \left(\frac{d\theta}{d\lambda}\right)_s = const. \quad (2.11)$$

За цих припущень після ідентичних перетворень можна отримати наступне спрощення рівняння (2.10):

$$\tau = \mu_g \left[\left(1 + \frac{R}{\delta}\right) \omega_d - \frac{R}{\delta} \omega_g \right] \sin\theta + \mu_g R \left(\frac{d\theta}{d\lambda}\right)_s \cos\theta. \quad (2.12)$$

Сила та момент тертя, що діють на поверхню краплі Ω визначаються так:

$$\begin{aligned}F_f &= \iint_{(\Omega)} \tau d\Omega = 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^\pi \tau R^2 \sin\theta d\theta d\varphi; \\ M_f &= \iint_{(\Omega)} \tau r d\Omega = 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^\pi \tau R^3 \sin\theta d\theta d\varphi,\end{aligned}\quad (2.13)$$

де $d\Omega = R^2 \sin\theta d\theta d\varphi$ – площа поверхні елементарної краплі (рисунок 1).

Підміна залежності (2.12) на залежність (2.13), після інтегрування дозволяє отримати такий вираз для сили тертя:

$$\begin{aligned} F_f &= \pi^2 R^2 \mu_g \left[\left(1 + \frac{R}{\delta}\right) \omega_d - \frac{R}{\delta} \omega_g \right]; \\ M_f &= \frac{8}{3} \pi R^3 \mu_g \left[\left(1 + \frac{R}{\delta}\right) \omega_d - \frac{R}{\delta} \omega_g \right]. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Таким чином, на краплю рідини в потоці газу діють сили та моменти опору та тертя, що визначаються виразами (2.7) та (2.14) відповідно.

Інтенсифікація внутрішніх потоків в краплі. Обертальний рух сферичної краплі в потоці газу під дією моментів опору та тертя описується наступним рівнянням [45]:

$$\frac{d(I_z \omega_d)}{dt} = I_z \frac{d\omega_d}{dt} + \omega_d \frac{dI_z}{dt} = M_d - M_f, \quad (2.15)$$

де I_z – момент інерції, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

t – час, с.

Врахування виразів для моменту інерції та її похідної за часом [46]:

$$I_z = \frac{8}{15} \pi \rho_d R^5; \quad dI_z = \frac{\partial I_z}{\partial R} d\lambda = \frac{8}{3} \pi \rho_d R^4 d\lambda, \quad (2.16)$$

де ρ_d – густина краплини, $\text{кг}/\text{м}^3$, так як і другі залежності (2.7) та (2.14) з ідентичностями $\frac{d\lambda}{dt} = v_r$ та $\varepsilon_d = \frac{d\omega_d}{dt}$ (ε_d – кутове прискорення, $\text{рад}/\text{с}^2$) дозволяє переписати рівняння (2.15) у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{8}{15} \pi \rho_d R^5 \varepsilon_d + \frac{8}{3} \pi \rho_d R^4 v_r \omega_d &= \frac{1}{2} \pi \psi \rho_g R^3 (a_0^2 + \frac{5}{2} R a_0 a_1 + \frac{7}{4} R^2 a_1^2 + v_r^2) - \\ &- \frac{8}{3} \pi R^3 \mu_g \left[\left(1 + \frac{R}{\delta}\right) \omega_d - \frac{R}{\delta} \omega_g \right]. \end{aligned} \quad (2.17)$$

У разі переважання інерційних сил у каналі радіальна складова швидкості незначна порівняно з кутовою: $v_r \ll v_\varphi$. Отже, компонентом v_r^2 в рівнянні (2.17) слід знехтувати порівняно з компонентом a_0^2 . В такому випадку після розгляду залежностей (2.2), особливо у разі рівномірного обертання ($\omega_d = \text{const}$), рівняння (2.17) дозволяє визначити радіальну швидкість наступним чином:

$$v_r = \frac{3}{16} \psi \frac{\rho_g}{\rho_d} R \omega_d \left[\left(\frac{v_1}{R \omega_d} \right)^2 + \frac{5}{2} \frac{v_1}{R \omega_d} + \frac{7}{4} \right] - \frac{\mu_g}{\rho_d} \left[1 + \frac{R}{\delta} \left(1 - \frac{\omega_g}{\omega_d} \right) \right] - \frac{1}{5} R \frac{\varepsilon_d}{\omega_d}. \quad (2.18)$$

Примітно, що радіальна складова v_r характеризує швидкість перенесення рідини всередині краплі як інтенсивність конвективного масопереносу. У цьому випадку витрата рідини через сферичну поверхню всередині краплі (рисунок 2.1):

$$Q = \int_{(S)} v_r dS = 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^\pi v_r \lambda^2 \sin\theta d\theta d\varphi = 4\pi \lambda^2 v_r. \quad (2.19)$$

Враховуючи вираз (2.18), залежність (2.19) показує, що інтенсивність радіальних течій у краплі залежить від градієнта поперечної швидкості $a_1 = \frac{\partial v_\varphi}{\partial x} = \frac{v_2 - v_1}{2R} = \omega_d$. Цей факт підтверджує можливість інтенсифікації процесів масопереносу за рахунок збільшення градієнта швидкості.

Рівняння руху крапель в газовому потоці. Для кількісного опису руху краплі у потоці газу розглядається наступна система диференціальних рівнянь поступального руху [47]:

$$\begin{cases} m_d \frac{dv_c}{dt} = F_d - F_f; \\ \frac{d(I_z \omega_d)}{dt} = M_d - M_f, \end{cases} \quad (2.20)$$

де $m_d = \frac{4}{3} \pi \rho_d R^3$ – маса частинки, кг.

Перше рівняння описує рух центру мас. Друге – рівняння (2.15) обертального руху. Розглядаючи рівняння (2.14) та (2.17), так само як вирази (2.2) та (2.3), дозволяє скоротити систему диференціальних рівнянь (2.20) до наступного загального вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_c}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\psi}{R} \frac{\rho_g}{\rho_d} [(v_c - \omega_d R)^2 + 2R(v_c - \omega_d R)\omega_d + \frac{5}{4} R^2 \omega_d^2 + v_r^2] - \\ \quad - \frac{3}{4} \pi \frac{\mu_g}{\rho_d R} [(1 + \frac{R}{\delta})\omega_d - \frac{R}{\delta} \omega_g]; \\ \frac{d\omega_d}{dt} + \frac{5}{R} v_r \omega_d = \frac{15}{16} \frac{\psi}{R^2} \frac{\rho_g}{\rho_d} [(v_c - \omega_d R)^2 + \frac{5}{2} R(v_c - \omega_d R)\omega_d + \frac{7}{4} R^2 \omega_d^2 + v_r^2] - \\ \quad - 5 \frac{\mu_g}{\rho_d R^2} [(1 + \frac{R}{\delta})\omega_d - \frac{R}{\delta} \omega_g]. \end{array} \right. \quad (2.21)$$

Ця система диференціальних рівнянь нелінійна і немає точного аналітичного рішення. Однак подальші дослідження можливі з використанням методу малих збурень [48]. Відповідно до цього методу всі параметри, що змінюються в часі, представлені наступним чином:

$$\begin{aligned} v_c &= v_{c0} + \delta v_c; \quad v_r = v_{r0} + \delta v_r; \\ \omega_d &= \omega_{d0} + \delta \omega_d; \quad \omega_g = \omega_{g0} + \delta \omega_g. \end{aligned} \quad (2.22)$$

де v_{c0} , v_{r0} , ω_{d0} , та ω_{g0} – розв'язання системи (2.21); що визначають гідродинамічні характеристики краплі рідини та потоку газу;

δv_{c0} , δv_{r0} , $\delta \omega_{d0}$, та $\delta \omega_{g0}$ – варіації оцінюваних параметрів як їхні малі збурення.

В результаті підстановки виразів (2.22) в систему (2.21), після нехтування членами вищих порядків малості $(\delta v_{c0})^2$, $(\delta v_{r0})^2$, $(\delta \omega_{d0})^2$, та $(\delta \omega_{g0})^2$, може бути отримана наступна система лінеаризованих диференціальних рівнянь у варіаціях:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\delta v_c}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\alpha}{R} [\beta_{11} \delta v_c + (\beta_{12} - \gamma) R \delta \omega_d + 2v_{r0} \delta v_r] + \frac{3}{4} \pi \eta \delta \omega_g; \\ \frac{d\delta \omega_d}{dt} = \frac{15}{16} \frac{\alpha}{R^2} \{ \beta_{21} \delta v_c + [\beta_{22} - \frac{16}{3} (\frac{\gamma}{\pi} - \frac{v_{r0}}{\alpha})] R \delta \omega_d + 2v_{r0} \delta v_r \} + 5 \frac{\eta}{R} \delta \omega_g, \end{array} \right. \quad (2.23)$$

де введено наступні позначення:

$$\alpha = \psi \frac{\rho_g}{\rho_d}; \beta = \begin{bmatrix} 2v_{c0} & \frac{1}{2}R\omega_{d0} \\ 2v_{c0} + \frac{1}{2}R\omega_{d0} & \frac{1}{2}(v_{c0} + R\omega_{d0}) \end{bmatrix}; \gamma = \pi \frac{v_g}{\psi R} \left(1 + \frac{R}{\delta}\right); \eta = \frac{\mu_g}{\rho_d \delta}, \quad (2.24)$$

та $v_g = \mu_g/\rho_g$ – кінематична в'язкість газу, м²/с.

Безрозмірний параметр α характеризує співвідношення щільностей та враховує коефіцієнт лобового опору, та β - матриця швидкостей. Параметр γ - масштабний коефіцієнт швидкості, м/с. Безрозмірний параметр η характеризує відношення коефіцієнта густини до числа Рейнольдса [49]. Він визначає значення радіальної швидкості v_r .

В операторній формі ця система набуває наступної матричної форми:

$$\begin{bmatrix} p - \frac{3}{4} \frac{\alpha}{R} \beta_{11} & -\frac{3}{4} \alpha (\beta_{12} - \gamma) \\ -\frac{15}{16} \frac{\alpha}{R^2} \beta_{21} & p - \frac{15}{16} \frac{\alpha}{R} [\beta_{22} - \frac{16}{3} (\frac{\gamma}{\pi} + \frac{v_{r0}}{\alpha})] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta v_c \\ \delta \omega_d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{3}{2} \\ \frac{15}{8R} \end{Bmatrix} \frac{\alpha}{R} v_{r0} \delta v_r + \begin{Bmatrix} \frac{3}{4} \pi \\ \frac{5}{R} \end{Bmatrix} \eta \delta \omega_g, \quad (2.25)$$

де $p = \frac{d}{dt}$ – оператор диференціювання часу.

Таким чином, система (2.23) або матричне рівняння (2.25) визначає гідродинаміку краплини рідини в потоці газу.

Стабільність руху краплі. Відповідно до метода Рауса-Гурвіца [50], стійкість руху краплі у потоці газу [51] досліджені при нульових збуреннях ($\delta v_r = \delta \omega_d = 0$) вивчаючи знаки коренів наступного характеристичного рівняння, що дорівнює рівнянню (2.25):

$$\det \begin{bmatrix} p - \frac{3}{4} \frac{\alpha}{R} \beta_{11} & -\frac{3}{4} \alpha (\beta_{12} - \gamma) \\ -\frac{15}{16} \frac{\alpha}{R^2} \beta_{21} & p - \frac{15}{16} \frac{\alpha}{R} [\beta_{22} - \frac{16}{3} (\frac{\gamma}{\pi} + \frac{v_{r0}}{\alpha})] \end{bmatrix} = \quad (2.26)$$

$$= p^2 + \frac{3}{4} \frac{\alpha}{R} \left[\frac{20}{3} \left(\frac{\gamma}{\pi} + \frac{v_{r0}}{\alpha} \right) - \beta_{11} - \frac{5}{4} \beta_{22} \right] p + \frac{45}{64} \frac{\alpha^2}{R^2} (\gamma - \beta_{12}) \beta_{21} = 0.$$

Це квадратне рівняння має наступні корені:

$$p_{1,2} = -\frac{3\alpha}{4R} \left[\frac{20}{3} \left(\frac{\gamma}{\pi} + \frac{v_{r0}}{\alpha} \right) - \beta_{11} - \frac{5}{4} \beta_{22} \right] \mp \sqrt{\frac{9\alpha^2}{64R^2} \left[\frac{20}{3} \left(\frac{\gamma}{\pi} + \frac{v_{r0}}{\alpha} \right) - \beta_{11} - \frac{5}{4} \beta_{22} \right]^2 - \frac{45\alpha^2}{64R^2} (\gamma - \beta_{12}) \beta_{21}}. \quad (2.27)$$

Стійкість динамічної системи необхідна і достатня, щоб отримані корені мали негативні дійсні частини [52]. Ця вимога досягається за наступної умови:

$$\beta_{11} + \frac{5}{4} \beta_{22} < \frac{20}{3} \left(\frac{\gamma}{\pi} + \frac{v_{r0}}{\alpha} \right). \quad (2.28)$$

Підстановка виразів (2.24) дозволяє скоротити отриману нерівність таким чином:

$$\bar{\omega}_d < \frac{32}{3} \left(\frac{1}{\pi} + \bar{v}_r \right) - \frac{21}{5} \bar{v}_{c0}, \quad (2.29)$$

де введені наступні безрозмірні кінематичні параметри:

$$\bar{\omega}_d = \frac{R\omega_d}{\gamma}; \quad \bar{v}_r = \frac{v_r}{\gamma}; \quad \bar{v}_{c0} = \frac{v_{c0}}{\gamma}. \quad (2.30)$$

Отримана нерівність (2.29) дозволяє графічно уявити область стійкості системи “краплина рідини - потік газу” в координатах “ $\bar{v}_{c0} - \bar{\omega}_d$ ” пов'язаних з основними кінематичними характеристиками краплі для різних значень безрозмірної радіальної швидкості \bar{v}_r (рисунок 2.2).

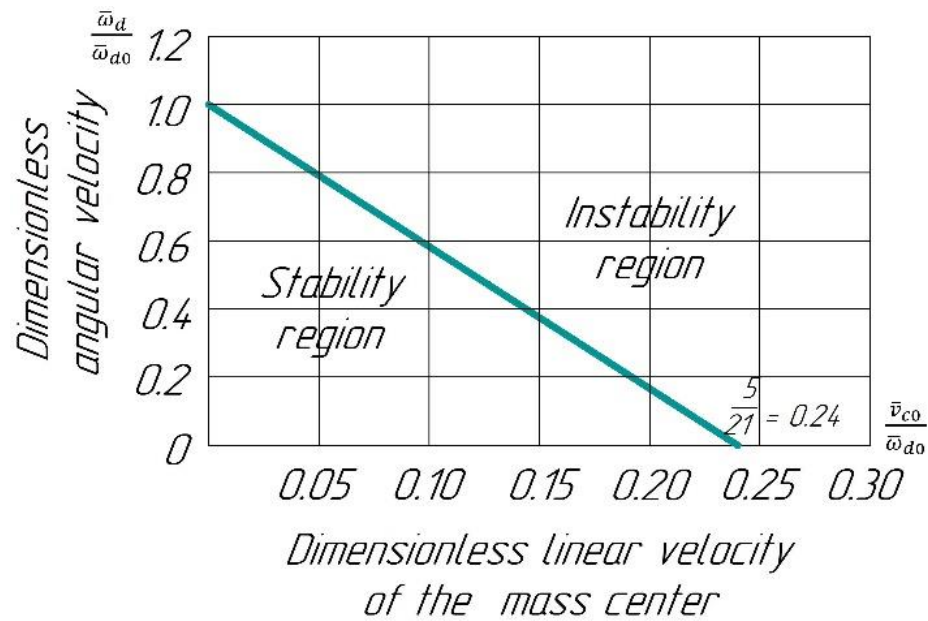


Рисунок 2.2 - Область стійкості рідинної краплини в газовому потоці

На цьому малюнку представлено початкове значення $\bar{\omega}_{d0} = \frac{32}{3} \left(\frac{1}{\pi} + \bar{v}_r \right)$.

Крім того, нерівність (2.29) дозволяє визначити критичне значення радіальної компоненти швидкості для заданих кінематичних характеристик краплі рідини в потоці газу:

$$\bar{v}_r^{cr} = \frac{63}{160} (\bar{v}_{c0} - \bar{v}_{c0}^*), \quad (2.31)$$

де $\bar{v}_{c0}^* = \frac{160}{63\pi} \approx 0.81$ – критичне значення безрозмірної швидкості. При його перевищенні циркуляційні потоки всередині краплі не впливають на стійкість руху в потоці газу.

Визначення порушень руху крапель. Для дослідження впливу вихрового газового потоку на гідродинаміку рідкої краплі застосовується метод комплексних амплітуд [53]. Відповідно до цього методу малі збурення кутової швидкості газу представляються в наступному вигляді:

$$\delta\omega_g = \Delta\omega_g e^{i\omega t}, \quad (2.32)$$

де $\Delta\omega_g$, ω – амплітуда та частота, рад/с;

i – уявна одиниця.

Розв'язок системи (2.25) має наступний вигляд:

$$\delta v_c = \Delta v_c e^{i\omega t}; \quad \delta \omega_d = \Delta \omega_d e^{i\omega t}, \quad (2.33)$$

де $\Delta\omega_g$ – комплексна амплітуда зміни швидкості центру мас, м/с;

$\Delta\omega_d$ – комплексна амплітуда зміни швидкості центру мас, рад/с.

Вирази (2.32) та (2.33) дозволяють переписати систему (25) наступним чином:

$$\begin{bmatrix} i\omega - \frac{3\alpha}{4R}\beta_{11} & -\frac{3}{4}\alpha(\beta_{12} - \gamma) \\ -\frac{15}{16}\frac{\alpha}{R^2}\beta_{21} & i\omega - \frac{15}{16}\frac{\alpha}{R}[\beta_{22} - \frac{16}{3}(\frac{\gamma}{\pi} + \frac{v_{r0}}{\alpha})] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta v_c \\ \Delta \omega_d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{3}{4}\pi \\ \frac{5}{R} \end{Bmatrix} \eta \Delta \omega_g, \quad (2.34)$$

де застосовано зміну оператора комплексного диференціювання $p = i\omega$.

Використання зворотної матриці дозволяє визначити комплексні амплітуди зміни кінематичних характеристик краплини рідини у потоці газу:

$$\begin{aligned} \Delta v_c &= \frac{3\pi}{4} \frac{\eta}{R} \Delta \omega_g \frac{5[v_r + \frac{\alpha}{\pi}(\beta_{12} - \frac{3\pi}{16}\beta_{22})] + i\omega R}{\frac{45\alpha^2}{64R^2}(\gamma - \beta_{12})\beta_{21} - \omega^2 + \frac{3\alpha}{4R}[\frac{20}{3}(\frac{\gamma}{\pi} + \frac{v_{r0}}{\alpha}) - \beta_{11} - \frac{5}{4}\beta_{22}]i\omega}; \\ \Delta \omega_d &= 5 \frac{\eta}{R^2} \Delta \omega_g \frac{\frac{3}{4}\alpha(\frac{3\pi}{16}\beta_{21} - \beta_{11}) + i\omega R}{\frac{45\alpha^2}{64R^2}(\gamma - \beta_{12})\beta_{21} - \omega^2 + \frac{3\alpha}{4R}[\frac{20}{3}(\frac{\gamma}{\pi} + \frac{v_{r0}}{\alpha}) - \beta_{11} - \frac{5}{4}\beta_{22}]i\omega}. \end{aligned} \quad (2.35)$$

Амплітуда кінематичних характеристик краплі рідини у вихровому газовому потоці оцінюється як модуль комплексних амплітуд (2.35):

$$\Delta v_c^a = |\Delta v_c| = \frac{3\pi}{4} \frac{\eta}{R} \Delta\omega_g \sqrt{\frac{25 \left[v_r + \frac{\alpha}{\pi} \left(\beta_{12} - \frac{3\pi}{16} \beta_{22} \right) \right]^2 + R^2 \omega^2}{\left[\frac{45\alpha^2}{64R^2} (\gamma - \beta_{12}) \beta_{21} - \omega^2 \right]^2 + \frac{9}{16} \frac{\alpha^2 \omega^2}{R^2} \left[\frac{20}{3} \left(\frac{\gamma}{\pi} + \frac{v_{r0}}{\alpha} \right) - \beta_{11} - \frac{5}{4} \beta_{22} \right]^2}}; \quad (2.36)$$

$$\Delta\omega_d^a = |\Delta\omega_d| = 5 \frac{\eta}{R^2} \Delta\omega_g \sqrt{\frac{\frac{9}{16} \alpha^2 \left(\frac{3\pi}{16} \beta_{21} - \beta_{11} \right)^2 + R^2 \omega^2}{\left[\frac{45\alpha^2}{64R^2} (\gamma - \beta_{12}) \beta_{21} - \omega^2 \right]^2 + \frac{9}{16} \frac{\alpha^2 \omega^2}{R^2} \left[\frac{20}{3} \left(\frac{\gamma}{\pi} + \frac{v_{r0}}{\alpha} \right) - \beta_{11} - \frac{5}{4} \beta_{22} \right]^2}}.$$

Рівномірне обертання рідкої краплі в квазі-рівноважному положенні. За певних гідродинамічних умов, що відповідають попарній рівності сил і моментів опору та тертя, настає квазірівноважний стан краплі:

$$F_d = F_f; \quad M_d = M_f. \quad (2.37)$$

Враховуючи вирази (2.2), (2.3), (2.7), та (2.14), рівняння (2.37) зводиться до наступної системи двох нелінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{3}{4} \frac{\psi}{R} \frac{\rho_g}{\rho_d} \left(v_1^2 + 2R\omega_d v_1 + \frac{5}{4} R^2 \omega_d^2 + v_r^2 \right) = \frac{3}{4} \pi \frac{\mu_g}{\rho_d R} \left[\left(1 + \frac{R}{\delta} \right) \omega_d - \frac{R}{\delta} \omega_g \right]; \\ \frac{15}{16} \frac{\psi}{R^2} \frac{\rho_g}{\rho_d} \left(v_1^2 + \frac{5}{2} R\omega_d v_1 + \frac{7}{4} R^2 \omega_d^2 + v_r^2 \right) = \frac{5}{R} v_r \omega_d + 5 \frac{\mu_g}{\rho_d R^2} \left[\left(1 + \frac{R}{\delta} \right) \omega_d - \frac{R}{\delta} \omega_g \right]. \end{cases} \quad (2.38)$$

Дане рівняння відрізняється від руху краплі (2.21) відсутністю інерційних складових. Примітно, що у двох крайніх випадках, коли кутова швидкість значно нижча за швидкість центру мас ($\omega_d \ll \frac{v_1}{R}$; $v_1 \approx v_c$), або, навпаки, значно перевищує її, вирази в лівих дужках обох рівнянь (38) стають рівними. У цьому випадку відношення лівої та правої частин цих рівнянь дозволяє отримати вираз для визначення кутової швидкості краплі у квазірівноважному стані:

$$\omega_d = \frac{\omega_g}{1 + \frac{\delta}{R} \left[1 + \frac{\rho_d v_r R}{\left(1 - \frac{3\pi}{16} \right) \mu_g} \right]}. \quad (2.39)$$

Цей вираз вказує на те, що інтенсивність радіальних потоків краплі впливає на її кутову швидкість у вихровому газовому потоці.

Наступні твердження підтверджують достовірність наведеної математичної моделі на основі аналізу останньої формули. Примітно, що збільшення товщини прикордонного шару та зменшення в'язкості газу призводить до зменшення кутової швидкості краплі рідини у потоці газу. Крім того, при рівному відношенні товщини пограничного шару до розміру краплі більші краплі мають меншу кутову швидкість.

Експериментальні та числові дослідження. Вплив градієнта окружної швидкості на інтенсифікацію внутрішньої циркуляції в рідкому крапельці, що рухається в газовому потоці, можна дослідити шляхом порівняння гідродинамічних характеристик потоку газу зі зміною інтенсивності процесів передачі маси, що відбуваються в вихровій камері масового обміну. Тому, щоб довести надійність розробленої математичної моделі було проаналізовано результати експериментальних досліджень, представлених в роботі [54].

Аналіз представлених результатів показав, що збільшення швидкості потоку газу призводить до збільшення кутової швидкості. При цьому збільшується різниця між швидкостями v_1 і v_2 потоку газу по обидва боки дисперсної краплини (рисунок 2.1). Отже, при збільшенні газових швидкостей збільшується і інтенсивність масообмінних процесів.

Таким чином, представлені результати обґрунтовують вплив гідродинамічних параметрів вихрового газового потоку на інтенсивність процесів масообміну в газорідних потоках. Кількісно залежності (2.19) і (2.39) дозволяють визначити ступінь впливу цих параметрів на циркуляційні потоки в рідких краплинах.

Для отримання якісних результатів були проведені наведені нижче числові симуляції для наступних вихідних даних. Фізичні властивості рідини (води) і газу (повітря): $\rho_d = 1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\rho_g = 1.28 \text{ кг/м}^3$; $\mu_g = 1.93 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\nu_g = \mu_g / \rho_g = 1.51 \cdot 10^{-5} \text{ (м}^2/\text{с)}$. Середній радіус краплин $R = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Товщина граничного шару $\delta = 0.1R = 0.5 \cdot 10^{-4}$, м. Діаметр вихрової камери $D = 0.25 \text{ м}$.

Кінематичні характеристики: $v_g = 15$ м/с; $\omega_{g0} = 2v_g/D = 120$ рад/с; $v_{c0} = 4.2$ м/с.
Коефіцієнт опору $\psi = 0.01$.

Додаткові параметри з формули (24): $\alpha = 1.28 \cdot 10^{-5}$; $\gamma = 104.4$ м/с;
 $\eta = 3.87 \cdot 10^{-4}$ м/с; $\beta_{11} = 8.40$ м/с; $\beta_{12} = 8.49$ м/с; $\beta_{21} = 8.41$ м/с; $\beta_{22} = 2.11$ м/с.
Радіальна швидкість $v_r = \eta = 3.87 \cdot 10^{-4}$ м/с. Інтенсивність радіального потоку
всередині краплини $Q = 4\pi R^2 v_r = 1.2 \cdot 10^{-9}$ м³/с. За формулою (39) кутова
швидкість крапельки $\omega_{d0} = 34$ рад/с.

Обидва корені $p_1 = -0.051$ (рад/с) and $p_2 = -7.854$ (рад/с) Рівняння (26) є
від'ємними. Цей факт свідчить про стійкість рідкого крапельки в потоці газу.
Крім того, оскільки безрозмірні кінематичні параметри (30) дорівнюють
 $\bar{v}_{c0} = 0.04$, $\bar{\omega}_d = 1.63 \cdot 10^{-4}$, та $\bar{v}_r = 0.29$, Нерівність (29) також зберігається. При
цьому характерна точка відноситься до області стійкості, представленої на рис.
2.2. Зокрема, для кутової швидкості повітря, обчисленої вище, виходять наступні
значення: $\Delta v_c^a = 0.015$ м/с; $\Delta \omega_d^a = 0.032$ рад/с.

Таким чином, запропонована методологія дозволяє кількісно оцінити
кінематичні характеристики рідкої краплі в газовому потоці і перевірити
стабільність цього руху.

Примітно, що, незважаючи на моделювання крапель, що мають сферичну
поверхню, поверхневі шари рідини рухаються в тому ж напрямку, що і газовий
потік. Поверхневий шар навколо крапельки рухається в окружному напрямку
відносно осі апарату. Після того, як в точці зближення потоків відбувається зміна
руху рідини в центр на задній стороні крапельки. На лицьовій стороні крапельки
є радіальний потік рідини. Він спрямований від центру до периферії і поступово
змінює напрямок. В результаті цей рух переростає в потік по окружності крапель
з обох сторін [55, 56].

2.2 Математична модель процесу осадження краплин золю в розчині аміаку

На основі експериментальних і чисельних результатів моделювання наявний досвід вказує на важливість розгляду сили Бассе при вивченні процесів сидементації і осадження дисперсних частинок, що рухаються поблизу жорстких кордонів [57]. У зв'язку з цим диференціальне формулювання сили Бассе для її чисельного розрахунку є актуальною проблемою в області обчислювальної механіки [58]. Останнім часом рішення цієї проблеми було пов'язано з застосування обчислень дробового порядку [59].

Тому актуальною задачею є розробка аналітичних методів розв'язання диференціального рівняння осадження частинок з урахуванням дробового походження сили Бассе.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання:

- обґрунтування дробового походження сили Бассета;
- отримання рівняння дробового порядку осадження частинок;
- розв'язування отриманого рівняння аналітично;
- валідація отриманого загального рішення аналітично;
- апроксимація чисельно отриманих тематичних досліджень отриманими аналітичними залежностями.

Проблеми сидементації частинок і осідання в гетерогенній системі не були ретельно досліджені. В перших роботах, присвячених вирішенню рівнянь руху дрібних частинок у в'язкій рідині і неоднорідному потоці [60, 61] в основному розглядалися слабка інерція і не ньютонівський вплив на динаміку частинок в рідині. Однак запропоновані аналітичні підходи не враховували дробове походження сили Бассе. Крім того, в роботі [62] досліджено рух сферичної частинки у в'язкій рідині і застосував алгоритм Томаса для визначення характеристик руху сферичної частинки уздовж стінки ковзання. Однак запропонована методика не дозволяє отримати загальне рішення рівняння осадження частинок аналітично.

В дослідженні [63] вивчали рух дрібних частинок у в'язкому середовищі в обертовому циліндрі, розглядаючи підйомну силу дробового порядку Саффмана. Однак ця сила діє на частинки в вихрових потоках. Крім того, автори представили лише порівняння з результатами, отриманими, розглядаючи силу опору як домінуючу. В науковій праці [64] вивчали проблему руху з'єднаних теплових і гідромеханічних частинок у в'язкій рідині при низьких числах Рейнольдса. В результаті був виведений загальний аналітичний вираз для визначення сили і її крутного моменту на частинці на основі взаємної теореми Лоренца. Однак це представлене аналітичне рішення не враховує дробовий порядок сили Бассе.

В роботі [65] представили загальний чисельний підхід до розрахунку сили Басе. Метод апроксимації сили Басе був запропонований ван Хінсбергом та ін. Однак такий підхід не дозволяє аналітично оцінити швидкість осадження і, отже, час осідання з достатньою точністю.

Ряд останніх науково-дослідних робіт були спрямовані на застосування дробових обчислень в області інженерії. Зокрема, в ході досліджень, представлених в [66], описано загальний підхід до вирішення дробових задач механіки Ньютона, заснований на диференціальних рівняннях дробового порядку. Однак такий підхід не може бути застосований для отримання аналітичного рішення рівняння осадження частинок дробового порядку строго.

В праці [67] запропонували аналітичну обробку хвильового рівняння з урахуванням дробових тертя і отримали рішення на основі функцій типу Міттаг-Лефлера. В роботі [68] вивчали динамічну поведінку нелінійних коливальних систем, описаних похідними часу дробового порядку. Запропонований підхід дозволив їм отримати наближення конкретних коливальних режимів для дослідження випадку фіксованого рівноважного положення.

Тому наступні дослідницькі прогалини в сидементації частинок в неоднорідній дисперсній системі повинні враховувати критичний огляд, приведений вище. По-перше, рівняння осідання частинок дробового порядку з урахуванням дробового походження сили Бассе має бути обґрунтоване і

вирішене аналітично. По-друге, загальне рішення запропонованого рівняння слід знайти чисельно. Нарешті, отримане рішення повинно бути перевірено аналітично і доведено чисельно.

Рівняння руху частинок з урахуванням сили Басе. Відповідно до рівняння руху малої жорсткої кулі в неоднорідному потоці [69], рівняння руху частинки, що рухається з швидкістю, що змінюється в часі в проекції на позитивний тангенціальний напрямок, має наступний вигляд:

$$m_p \frac{dv_p(t)}{dt} = F_g - F_A - F_d - F_f - F_B, \quad (2.40)$$

де m_p —маса частинки, кг;

v_p —швидкість частинки, м/с;

t — час, с;

$F_g = m_p g$ — сила тяжіння, Н;

g — прискорення вільного падіння, м/с²;

$F_A = m_f g$ —сила Архімеду, Н;

m_f — додана маса потоку, кг;

$F_d = 6\pi\mu a v_p(t)$ — сила опору, Н;

μ — динамічна в'язкість, Па·с;

a — радіус частинки, м; $F_f = \frac{1}{2} m_f \frac{dv_p(t)}{dt}$ — сила потоку доданої маси, Н;

F_B — сила Басе, що визначається наступним чином [70]:

$$F_B = 6\pi\mu a^2 \int_0^t \frac{\frac{dv_p(\tau)}{d\tau}}{\sqrt{\pi\nu(t-\tau)}} d\tau, \quad (2.41)$$

де ν — кінематична в'язкість, м²/с;

τ — параметр часу, с.

Згадані вище вирази дозволяють переписати рівняння (2.40) наступним чином:

$$\left(m_p + \frac{1}{2}m_f\right) \frac{dv_p(t)}{dt} + 6\sqrt{\pi\rho\mu}a^2 \int_0^t \frac{dv_p(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau + 6\pi\mu a v_p(t) = (m_p - m_f)g, \quad (2.42)$$

де ρ — густина рідини, кг/м³.

Введення параметрів

$$\alpha = \frac{3\pi\sqrt{\rho\mu}a^2}{m_p + \frac{1}{2}m_f}; \quad n = \frac{6\pi\mu a}{m_p + \frac{1}{2}m_f}; \quad v_{p\infty} = \frac{(m_p - m_f)g}{6\pi\mu a} \quad (2.43)$$

дозволяє переписати інтегро-диференціальне рівняння (2.42) в наступному вигляді:

$$\frac{dv_p(t)}{dt} + \frac{2\alpha}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{dv_p(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau + n v_p(t) = n v_{p\infty}, \quad (2.44)$$

де n — фактор релаксації, с⁻¹;

α — коефіцієнт сили Бассе, с^{-1/2};

$v_{p\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} v(t)$ — стаціонарна швидкість, м/с.

Диференціальні рівняння дробового порядку осідання частинок. Для подальшого аналітичного розв'язання рівняння (2.44) розглядаються інтегральна і похідна Ріман-Ліувіль [71] і дробова похідна Грюнвальда-Летнікова [72]:

$$\begin{aligned} I_{t_0,t}^\beta v_p(t) &= \frac{1}{\Gamma(\beta)} \int_{t_0}^t v_p(\tau) (t-\tau)^{\beta-1} d\tau; \\ D_{t_0,t}^\beta v_p(t) &= \frac{1}{\Gamma(|\beta|-\beta)} \frac{d^{|\beta|}}{dt^{|\beta|}} \int_{t_0}^t v_p(\tau) (t-\tau)^{\beta-|\beta|+1} d\tau; \\ D_{t_0,t}^\beta v_p(t) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{t-t_0}{N}\right)^\beta \sum_{i=0}^N \frac{\Gamma(\alpha+i)}{i!\Gamma(\alpha)} v_p \left[t - \frac{i}{N}(t-t_0)\right] = I_{t_0,t}^{-\beta} v_p(t), \end{aligned} \quad (2.45)$$

де β — дробовий порядок;

t_0 — початковий час, с;

$\Gamma(\beta)$ — гамма-функція [73]:

$$\Gamma(\beta) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{\beta-1} dx, \quad \operatorname{Re}(\beta) > 0. \quad (2.46)$$

Враховуючи зв'язок між дробовими похідними [74]:

$$D_{t_0,t}^{\gamma} \left[\frac{d^r}{dt^r} v_p(t) \right] = \frac{d^r}{dt^r} \left[D_{t_0,t}^{\gamma} v_p(t) \right] - \frac{(t-t_0)^{-\gamma-r+i}}{\Gamma(-\gamma-r+i+1)} \left[\frac{d^i}{dt^i} v_p(t) \right]_{t=t_0}, \quad (2.47)$$

в такому випадку of $\gamma = 1/2$, $r = 1$ для початкового часу $t_0 = 0$, та враховуючи $\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi}$, наступне рівняння може бути записано:

$$I_{0,t}^{\frac{1}{2}} \left[\frac{dv_p(t)}{dt} \right] = D_{0,t}^{\frac{1}{2}} [v_p(t)] - \frac{v_p(0)}{\sqrt{\pi t}}. \quad (2.48)$$

Порівняння виразів (2.41) та (2.48) з інтегро-диференціалом Рімана – Ліувіля (2.45) для значення $\beta = 1/2$ та початкового моменту часу $t_0 = 0$, так як і для випадку нульової початкової умови ($v_p(0) = 0$), дозволяє визначити силу Бассе з погляду дробового обчислення:

$$F_B = 6\pi a^2 \sqrt{\mu\rho} I_{0,t}^{\frac{1}{2}} \left[\frac{dv_p(t)}{dt} \right] = 6\pi a^2 \sqrt{\mu\rho} D_{0,t}^{\frac{1}{2}} [v_p(t)]. \quad (2.49)$$

Отже, рівняння (2.44) набуває наступного вигляду:

$$\frac{dv_p(t)}{dt} + 2\alpha \frac{d^{\frac{1}{2}} v_p(t)}{dt^{\frac{1}{2}}} + n v_p(t) = n v_{p\infty}. \quad (2.50)$$

Слід зазначити, що дана формула є диференціальним рівнянням осадження частинок дробового порядку, яке враховує силу Бассе. Це рівняння можна

застосовувати для більш точного моделювання процесів осадження дрібних частинок у рідинах, осадження аерозолів у потоці газу та осадження частинок газодисперсних системах.

Загальне рішення диференціального рівняння дробового порядку осадження частинок. Для аналітичного рішення рівняння (2.50), використовується перетворення Лапласа [75] для початкової нульової умови ($v_p(0) = 0$). У цьому випадку можна отримати наступну порівняльну операцію:

$$(s + 2\alpha\sqrt{s} + n)V_p(s) = \frac{nv_{p\infty}}{s}, \quad (2.51)$$

де s — комплексний частотний параметр, s^{-1} ;

$V_p(s)$ — Перетворення Лапласа швидкості частки, м:

$$V_p(s) = \int_0^{\infty} v_p(t)e^{-st} dt, \quad (2.52)$$

яке можна визначити із алгебраїчного рівняння (2.51):

$$V_p(s) = \frac{nv_{p\infty}}{s(s+2\alpha\sqrt{s}+n)} = nv_{p\infty} \left(\frac{a_1}{\sqrt{s}} + \frac{a_2}{s} + \frac{a_3}{\sqrt{s}-\theta_1} + \frac{a_4}{\sqrt{s}-\theta_2} \right), \quad (2.53)$$

де $\theta_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - n}$ — пара коренів квадратного рівняння $\theta^2 + 2\alpha\theta + n = 0$.

Слід зазначити, що, $\theta = \sqrt{s}$. Невідомі параметри a_1, a_2, a_3 , та a_4 знаходяться з наступного матричного рівняння:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ -(\theta_1 + \theta_2) & 1 & -\theta_2 & -\theta_1 \\ \theta_1\theta_2 & -(\theta_1 + \theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & \theta_1\theta_2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}. \quad (2.54)$$

На основі методу зворотної матриці після ідентичного перетворення можна отримати наступні залежності:

$$a_1 = -\frac{2\alpha}{n^2}; \quad a_2 = \frac{1}{n}; \quad a_{3,4} = \pm \frac{1}{2(\alpha \mp \sqrt{\alpha^2 - n})}. \quad (2.55)$$

Введення параметрів $\theta = -\theta_1$ та $\theta' = -\theta_2$, та з огляду на рівність $L^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{s}}\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi t}}$ дозволяє застосувати зворотне перетворення Лапласу [76] до рівняння (2.53):

$$v_p(t) = nv_{p\infty} \left[\frac{a_1}{\sqrt{\pi t}} + a_2 H(t) + a_3 L^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{s+\theta}}\right) + a_4 L^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{s+\theta'}}\right) \right], \quad (2.56)$$

де $H(t)$ — функція Гевісайда.

Примітно, що відсутність сингулярності для цього рішення буде підтверджено нижче. Для подальшого розгляду використовується функція Міттаг - Лефлера [77]:

$$E_{\gamma,\beta}(z) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{z^i}{\Gamma(\gamma i + \beta)}. \quad (2.57)$$

Він має наступну особливість з погляду перетворення Лапласа [78]:

$$L[t^{\beta-1} E_{\gamma,\beta}(\theta t^\gamma)] = \frac{s^{\gamma-\beta}}{s^\gamma - \theta}. \quad (2.58)$$

Отже, наступне зворотне перетворення Лапласу для випадку $\gamma = 1/2$ і $\beta = 1$ можна записати таким чином:

$$L\left[E_{\frac{1}{2},1}(\theta\sqrt{t})\right] = \frac{1}{\sqrt{s}(\sqrt{s}-\theta)} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{1}{\sqrt{s}-\theta} - \frac{1}{\sqrt{s}} \right). \quad (2.59)$$

Отже, можна отримати наступне зворотне перетворення Лапласа:

$$L^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{s-\theta}}\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi t}} + \theta E_{\frac{1}{2},1}(\theta\sqrt{t}). \quad (2.60)$$

Крім того, розкладання

$$\frac{1}{s-\theta^2} = \frac{1}{2\theta} \left(\frac{1}{\sqrt{s-\theta}} - \frac{1}{\sqrt{s+\theta}} \right) \quad (2.61)$$

з рівністю $L^{-1}\left(\frac{1}{s-\theta^2}\right) = e^{\theta^2 t}$ з виразом (2.60) дозволяє отримати наступне зворотне перетворення Лапласа:

$$L^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{s+\theta}}\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi t}} + \theta E_{\frac{1}{2},1}(\theta\sqrt{t}) - 2\theta e^{\theta^2 t}. \quad (2.62)$$

Отже, рішення (16) можна переписати у такому вигляді:

$$v_p(t) = nv_{p\infty} \left[\frac{a_1+a_3+a_4}{\sqrt{\pi t}} + a_2 H(t) + a_3 \theta E_{\frac{1}{2},1}(\theta\sqrt{t}) + a_4 \theta' E_{\frac{1}{2},1}(\theta'\sqrt{t}) - 2(a_3 \theta e^{\theta^2 t} + a_4 \theta' e^{\theta'^2 t}) \right], \quad (2.63)$$

Слід зазначити, що, $a_1 + a_3 + a_4 \equiv 0$ у зв'язку з виразом (2.55), та $H(t) = 1$ для $t > 0$. Отже, рішення (2.63) можна переписати у такому вигляді:

$$v_p(t) = v_{p\infty} \left\{ 1 - n \left[2(a_3 \theta e^{\theta^2 t} + a_4 \theta' e^{\theta'^2 t}) - a_3 \theta E_{\frac{1}{2},1}(\theta\sqrt{t}) - a_4 \theta' E_{\frac{1}{2},1}(\theta'\sqrt{t}) \right] \right\}. \quad (2.64)$$

Примітно, що в практичних рекомендаціях отримане рішення нерівності $\alpha^2 < n$, здається складним у зв'язку зі складністю параметрів $\theta_{1,2}$. Отже, належність цього рішення реального діапазону значень має бути доведена виключно теоретично. Для цього розглядаються комплексні параметри $\theta_{1,2} = -\alpha \pm j\sqrt{n - \alpha^2}$ (j – уявна одиниця: $j^2 = -1$). Підстановка цих параметрів у формулу (2.64), а також використання біноміальної теореми Ньютона [79] та властивостей гіперболічних функцій [80] дозволяє отримати наступні вирази:

$$\begin{aligned}
a_3 \theta e^{\theta^2 t} + a_4 \theta' e^{\theta'^2 t} &= \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{t^{\frac{i}{2}}}{\Gamma(\frac{i}{2}+1)} \sum_{r=0}^i \binom{i}{r} \alpha^{i-r} (n - \alpha^2)^{\frac{r}{2}} \left(\cos \frac{\pi i}{2} - \frac{\alpha}{\sqrt{n-\alpha^2}} \sin \frac{\pi i}{2} \right); \\
a_3 \theta E_{\frac{1}{2},1}(\theta \sqrt{t}) + a_4 \theta' E_{\frac{1}{2},1}(\theta' \sqrt{t}) &= \frac{1}{n} e^{-(n-2\alpha^2)t} \left(\cos 2\alpha \sqrt{n-\alpha^2} t - \frac{\alpha}{\sqrt{n-\alpha^2}} \sin 2\alpha \sqrt{n-\alpha^2} t \right).
\end{aligned} \tag{2.65}$$

Отже, швидкість (25) належить до реального діапазону значень.

Нарешті, загальне рішення (25) диференціального рівняння дробового порядку (2.50) осадження частинок, яке враховує силу Бассе, набуває наступного вигляду:

$$\begin{aligned}
v_p(t) &= v_{p\infty} \left[1 - 2e^{-(n-2\alpha^2)t} \left(\cos 2\alpha \sqrt{n-\alpha^2} t - \frac{\alpha}{\sqrt{n-\alpha^2}} \sin 2\alpha \sqrt{n-\alpha^2} t \right) + \right. \\
&\quad \left. + \sum_{i=0}^{\infty} \frac{t^{\frac{i}{2}}}{\Gamma(\frac{i}{2}+1)} \sum_{r=0}^i \binom{i}{r} \alpha^{i-r} (n - \alpha^2)^{\frac{r}{2}} \left(\cos \frac{\pi i}{2} - \frac{\alpha}{\sqrt{n-\alpha^2}} \sin \frac{\pi i}{2} \right) \right].
\end{aligned} \tag{2.66}$$

Конкретний випадок дослідження. Для перевірки отриманого загального рішення (2.66) диференціального рівняння дробового порядку (2.50) розглядається окремий випадок для $\alpha = 0$. У цьому випадку рішення набуває наступного вигляду:

$$v_{p0}(t) = v_{p\infty} \left[1 - 2e^{-nt} + E'_{\frac{1}{2},1}(\sqrt{nt}) \right], \tag{2.67}$$

де введено наступну модифіковану функцію Міттаг - Лефлера:

$$E_{\gamma,\beta}^{<c>}(z) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{z^i}{\Gamma(\gamma i + \beta)} \cos \frac{\pi i}{2}, \tag{2.68}$$

який відрізняється від традиційного (2.57) множником $\cos \frac{\pi i}{2}$.

Модифікована функція Міттаг – Лефлера має таку особливість:

$$E_{\frac{1}{2},1}^{<c>}(z) \equiv e^{-z^2}. \tag{2.69}$$

У цьому випадку конкретне рішення (2.67) набуває вигляду:

$$v_{p0}(t) = v_{p\infty}(1 - e^{-nt}), \quad (2.70)$$

що відповідає традиційному [81].

Таким чином, загальне рішення (2.66) відкриває нові області у вивченні процесу осадження частинок потоку рідини.

Аналіз головних порядків загального рішення. Для аналізу головних порядків загального рішення (2.66) введені безрозмірна швидкість $\bar{v}_p(\tau) = \frac{v_p(\tau)}{v_{p\infty}}$, безрозмірний час $\tau = nt$, та безрозмірний коефіцієнт сили Басе $\varepsilon = \frac{\alpha}{\sqrt{n}}$. Відповідно, рівняння (2.66) набуває наступного безрозмірного вигляду:

$$\begin{aligned} \bar{v}_p(\tau) = & 1 - 2e^{-\tau} e^{2\varepsilon^2\tau} \left(\cos 2\varepsilon\sqrt{1-\varepsilon^2}\tau - \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \sin 2\varepsilon\sqrt{1-\varepsilon^2}\tau \right) + \\ & + \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\tau^{\frac{i}{2}}}{\Gamma(\frac{i}{2}+1)} \sum_{r=0}^i \binom{i}{r} \varepsilon^{i-r} (1-\varepsilon^2)^{\frac{r}{2}} \left(\cos \frac{\pi i}{2} - \frac{\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \sin \frac{\pi i}{2} \right). \end{aligned} \quad (2.71)$$

Для першого наближення, у випадку щодо малих значень $\varepsilon \ll 1$, після розкладання до ряду Маклорена, залишивши тільки члени першого порядку ε , рівняння (2.66) з урахуванням тотожності (2.69) та залежності (2.70) можна приблизно переписати таким чином:

$$\bar{v}_p(\tau) = 1 - e^{-\tau} - \varepsilon E_{\frac{1}{2},1}^{<s>}(\sqrt{\tau}) = \bar{v}_{p0}(\tau) - \delta\bar{v}_p(\tau), \quad (2.72)$$

де введено варіацію першого порядку:

$$\delta\bar{v}_p(\tau) = \varepsilon E_{\frac{1}{2},1}^{<s>}(\sqrt{\tau}). \quad (2.73)$$

Він містить модифіковану функцію Міттаг - Лефлера.

$$E_{\gamma,\beta}^{<s>}(z) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{z^i}{\Gamma(\gamma i + \beta)} \sin \frac{\pi i}{2} \quad (2.74)$$

для значень $\gamma = \frac{1}{2}$, $\beta = 1$ та аргумент $z = \sqrt{\tau}$.

У зв'язку з наведеними вище результатами головні члени виразу (2.66) є першими членами подвійної суми для випадку of $i = r = 0$, де $\varepsilon^{i-r} = \varepsilon^0 = 1$:

Множник перед $\cos(2\alpha\sqrt{n - \alpha^2 t}) = \cos(2\varepsilon\sqrt{1 - \varepsilon^2 \tau})$, у випадку використання рівності (2.69) дозволяє розрахувати головний компонент (2.70). Цей компонент відповідає за швидкість седиментації без урахування сили Бассе.

Множник перед $\sin(2\alpha\sqrt{n - \alpha^2 t}) = \sin(2\varepsilon\sqrt{1 - \varepsilon^2 \tau})$. Це дозволяє отримати зміну швидкості (2.73), пропорційну до безрозмірного параметра ε . Ця складова дозволяє привести загальне рішення (2.66) до спрощеної варіаційної форми (2.72) за безрозмірними параметрами ε і τ . Примітно, що завдяки виразу (2.72) збільшення сили Бассе (безрозмірний параметр ε) призводить до зменшення швидкості седиментації.

Для практичних цілей спрощення (2.72) може застосовуватись для значень безрозмірного коефіцієнта $\leq 0,23$, оскільки максимальне відносне відхилення швидкості седиментації від точного аналітичного рішення (2.66) становить менше 10%. Отже, якщо безрозмірний коефіцієнт ε більший, ніж це критичне значення, перевагу слід віддати виразу (2.66) або (2.71).

На рисунку 2.5 представлено безрозмірне рішення (2.71) рівняння седиментації часток (2.50) для різних безрозмірних параметрів ε в широкому діапазоні (від 0 до 1).

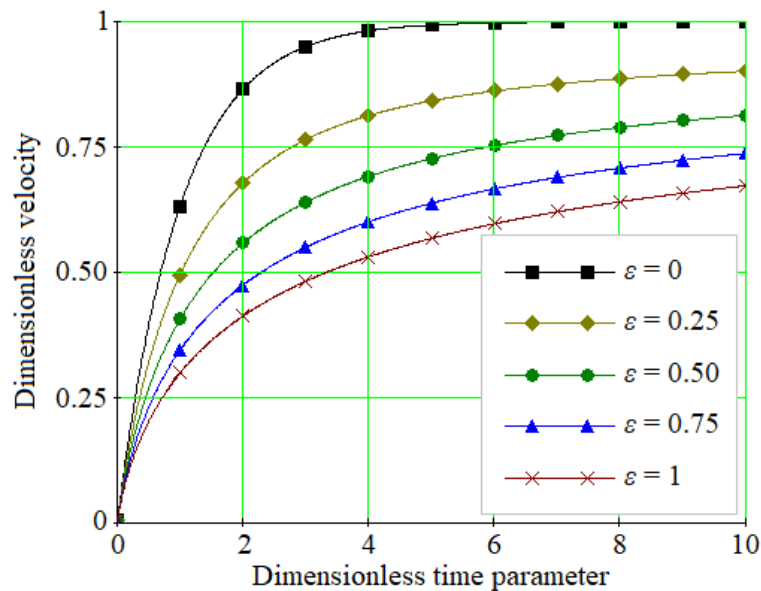


Рисунок 2.3 - Порівняльний аналіз безрозмірних рішень для інтегродиференціальних рівнянь дробового порядку осадження частинок

Всі рішення асимптотично наближаються до горизонтальних ліній максимальних швидкостей седиментації.

Порівняння з результатами числового моделювання. Наступним кроком для доказу отриманого загального рішення (2.66) є порівняння з результатами чисельного моделювання.

Пряме інтегрування диференціального рівняння дробового порядку (2.50) може бути реалізовано за допомогою підходу, заснованого на методі S-наближення [82] з використанням блочно-імпульсної операційної матриці (S(t)) [83], елементами якої є:

$$S_i(t) = \frac{1}{2} \{ \text{sign}(t - i\Delta t) - \text{sign}[t - (i + 1)\Delta t] \}, \quad (2.75)$$

де i — індекс ділянки та $\Delta t = t_{max}/N$ — крок часу (t_{max} — максимальний часовий діапазон;

N — кількість графіків для числового інтегрування).

У цьому випадку вихідне диференціальне рівняння дробового порядку (2.50) перетворюється на наступне інтегральне рівняння дробового порядку:

$$v_p(t) + 2\alpha I_{0,t}^{\frac{1}{2}}[v_p(t)] + nI_{0,t}^1[v_p(t)] = nv_{p\infty}t, \quad (2.76)$$

яке задовольняє нульову початкову умову, оскільки $v_p(0) = 0$.

Числове рішення цього інтегрального рівняння ґрунтується на наступному операційному аналізі [84]:

$$([E] + 2\alpha[P^{<0.5>}] + n[P^{<1>}])\{Y\} = \{F\}, \quad (2.77)$$

де $\{Y\}$ — операційний вектор-стовпець рішення;

$[E]$ — одинична матриця з розмірами $N \times N$, та $[P^{<0.5>}]$, $[P^{<1>}]$ — елементи операційної матриці $[P^{<\beta>}]$ ($\beta = 0.5$, та $\beta = 1$, відповідно), елементи яких визначаються наступним чином:

$$P_{i,j}^{<\beta>} = p(\beta, i - j), \quad (2.78)$$

де $p(\beta, r)$ — наступна функція ($|r| = 0, 1, \dots, N-1$):

$$P_{i,j}^{<\beta>} = \frac{\Delta t^\beta}{\Gamma(\beta+2)} \cdot \begin{cases} 1, & i = j; \\ (r+1)^{\beta+1} - 2r^{\beta+1} + (r-1)^{\beta+1}, & i > j, \\ 0, & i < j. \end{cases} \quad (2.79)$$

Елементи F_i ($i = 1, 2, \dots, N$) операційного вектора-стовпчика зовнішнього впливу $\{F\}$ визначаються наступним чином:

$$F_i = \frac{1}{h} \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} nv_{p\infty}t dt = \left(i + \frac{1}{2}\right) \Delta t \cdot nv_{p\infty}. \quad (2.80)$$

Використовуючи метод зворотної матриці [85], операційний вектор-стовпець рішення:

$$\{Y\} = ([E] + 2\alpha[P^{<0.5>}] + n[P^{<1>}])^{-1}\{F\} \quad (2.81)$$

дозволяє отримати наступне числове рішення вихідного рівняння (33):

$$v_p(t) = \sum_{i=0}^{N-1} Y_i S_i(t). \quad (2.82)$$

На рисунку 2.3 також представлені числові результати розв'язання рівняння осадження частинок (2.76). Лінії апроксимації всіх даних повністю збігаються з аналітично отриманою функцією (2.71). Цей факт додатково доводить адекватність аналітичного підходу на вирішення диференціального рівняння осадження частинок дробового порядку.

Примітно, що сила Басе значно збільшує безрозмірний час седиментації, що визначається з умови $v_p = (1 - \delta)v_{p\infty}$, де δ — відхилення швидкості седиментації від стаціонарної $v_{p\infty}$, що зазвичай приймається рівним $\delta = 0.05$.

Зокрема, якщо не зважати на силу Басе ($\varepsilon = 0$), то безрозмірний час осадження дорівнює 3.0 (рисунок 2.3). Однак навіть з урахуванням параметра $\varepsilon = 0.05$, цей безрозмірний часовий параметр збільшується на 43% і стає рівним 4,3. Даний факт пояснює використання значних коригувальних факторів в технологічних процесах, де присутня седиментація і осадження частинок. Однак використання диференційного рівняння дробового порядку осідання частинок дозволяє уникнути недостовірних корекційних коефіцієнтів при моделюванні технологічних процесів і розробці відповідного технологічного обладнання.

Диференціальне рівняння дробового порядку (2.50) і його аналітичне рішення (2.66) усувають прогалину у вивченні процесів сидементації.

Примітно, що в науковій праці [86] отримано аналітичне рішення диференціального рівняння дробового порядку для процесу вільного падіння. Зазначений в роботі підхід взагалі не враховує силу Басе. Більш того, розгляд цієї

сили дає можливість використовувати дробову похідну зміщення частинок тільки для ступеня $3/2$.

В роботі [87] досліджено осідання сферичних частинок у в'язкій рідині з урахуванням сили Басе. Однак рішення було отримано чисельно для окремих випадків. Крім того, числові результати моделювання можна отримати за допомогою операційної матриці на основі многочленів Legendre, запропонованих Саадатманді і Дехганом [88]. Однак отримані криві, представлені на рисунку 2.3, залишаються незмінними з точки зору їх наближення отриманим аналітичним рішенням (2.66).

Всі ці недоліки були усунені за допомогою функції Міттаг-Леффлер і її конкретних властивостей. Крім того, обґрунтовано адекватність запропонованого рішення для уявних аргументів. Нарешті, сингулярність диференціально-інтегрального рівняння осадження дробового порядку була доведена аналітично [89].

Примітно, що запропонований підхід може бути застосований не тільки для задач сидементації і осадження частинок, але і для вирішення проблем осадження дрібнодисперсних краплин золю в розчині аміаку при виробництві каталізатору двоокису алюмінію.

2.3 Особливості витікання стисненого струменя через отвір з урахуванням нахилу отвору та попередньої циркуляції

Отже, тільки теоретичним шляхом питання витікання струменю через отвір вирішити неможливо. Про це свідчать наведені в першому розділі емпіричні залежності для визначення коефіцієнта μ . Очевидно, витікання з нахилом осі отвору, можна досліджувати тим же шляхом, як це робилось багатьма авторами при витіканні. Основні критерії, характеризуючи рух в цьому випадку також чітко визначені (Re , d_0 , α° , H).

Що стосується до експериментальних послідовних витікання при наявності у посудині циркуляції, то тут виникають питання без вирішення яких

експеримент проводити взагалі недоцільно. Зокрема, при витіканні з циркуляцією, в центрі склянки з'являється вихрова трубка, яка займає центральну частину отвору і, отже, витікання відбувається не повним отвором, а у вигляді полого кільця. Природньо, що інтенсивність цієї вихрової трубки залежить від циркуляції, створюваної в склянці. Тому, чим більша циркуляція тим більше діаметр вихрової трубки (см. нижче), а отже, і кільцевій пасок, через який проходить витікання. Окрім того, для такого витікання критерій Рейнольдса, визначений за формулою (1.9) втрачай зміст так як теоретична швидкість $V = \sqrt{2gH}$ і діаметр отвору d вже не характеризують в даному випадку режим течії.

Очевидно, в якості характеристики швидкості в даному випадку може слугувати окружна швидкість вихору $V_{\text{ув}}$ в площині отвору. Однак для визначення цієї швидкості необхідно знати напруженість вихору і його діаметр в площині отвору. Враховуючи, необхідність першочергового визначення числа Рейнольдса (для встановлення режиму течії), в якості характеристики швидкості для визначення числа Re будемо приймати окружну швидкість вихору з діаметром рівним діаметру отвору. Очевидно, таке допущення не приведе до значної погрішності, так як діаметр вихору хоч і буде відрізнятися від діаметру отвору, а швидкість, яка змінюється по радіусу по гіперболічному закону, буде відрізнятися несуттєво, в наслідок малої різниці в діаметрах вихору і отвору.

Таким чином, нам залишається визначити напруженість вихору в залежності від циркуляції в склянці. На практиці циркуляція в стакані створюються за рахунок нерівномірної подачі рідини в склянку, або подачі її під кутом. І в тому і другому випадках, очевидно, циркуляція в стакані і буде залежати від моменту швидкості, яка належить підведеної в склянку рідини. Тому спробуємо визначити напруженість вихору в залежності від моменту швидкості, який має рідина, що подається в стакан. Ця задача має практичний інтерес, так як вимірявши в промисловій установці відомими методами момент швидкості, можна буде вирахувати напруженість вихору, а потім і визначити коефіцієнт випрати в залежності від числа Re і напруженості. Окрім того,

вирішення цієї задачі необхідно для проведення експериментальних досліджень, так як розгляд ряду відомих методів визначення циркуляції вихору показали, що в даному специфічному випадку вони не дозволяють навіть приблизно виміряти циркуляцію.

Незалежно від способу створення моменту швидкості, його завжди можна віднести к довільному радіусу. В наших дослідах віднесемо його к внутрішньому радіусу стакану r_0 . Момент віднесений к радіусу стакану, який підводиться зовні будемо рахувати відомим (або заданим). Очевидно, підведений момент швидкості буде витрачатись на закручування рідини в стакані $M_{жс}$ і на подолання моменту сил тертя M_t о стінки стакану, тобто, момент:

$$\mu = \mu_{ж} + \mu_t \quad (2.83)$$

який приходить на закручування рідини в стакані $\mu_{ж}$, очевидно, і буде створювати циркуляцію в стакані. Виразимо цей момент через кількість закрученої рідини і середній радіус стакану $r_{ср}$.

$$\mu_{ж} = \rho \frac{\pi D^2}{4} H \cdot V_{иср} \cdot r_{ср} \quad (2.84)$$

де $V_{иср}$ – окружна швидкість на середньому радіусі $r_{ср} = \frac{r_0}{2}$

Враховуючи, що

$$V_{иср} = \frac{\Gamma}{2\pi r_{ср}} = \frac{2\Gamma}{\pi D} \quad (2.85)$$

Отримали

$$\mu_{ж} = \frac{1}{8} \rho D^2 \Gamma H \quad (2.86)$$

Отже, якщо визначити момент, втрачений на стінках стакану на подолання сил тертя, то можна буде визначити значення циркуляції Γ в залежності від підведеного моменту μ і навпаки, задавшись циркуляцією можна буде підрахувати необхідний для її створення момент.

Для визначення гальмівного моменту μ_m приймемо наступну схему руху рідини в стакані. В безпосередній близькості у стінок знаходиться пограничний шар, де рідину треба розглядати в'язкою. Рідина, яка знаходиться поза пограничного шару, будемо розглядати як ідеальну. Така ідеалізація допускається так як в протилежному випадку, через складність рівнянь руху в'язкої рідини, отримати рішення не уявляється можливим.

Розглянемо пограничний шар у стінки, прийнявши циліндричну систему координат.

Диференціальні рівняння для пограничного шару хоч і значно спрощуються, однак і їх вирішення пов'язано з певними труднощами. Тому скористаємося теоремою про зміну кількості руху, застосувавши її до елементарної ділянки пограничного шару, позначеної на схемі як 1 2 3 та 4.

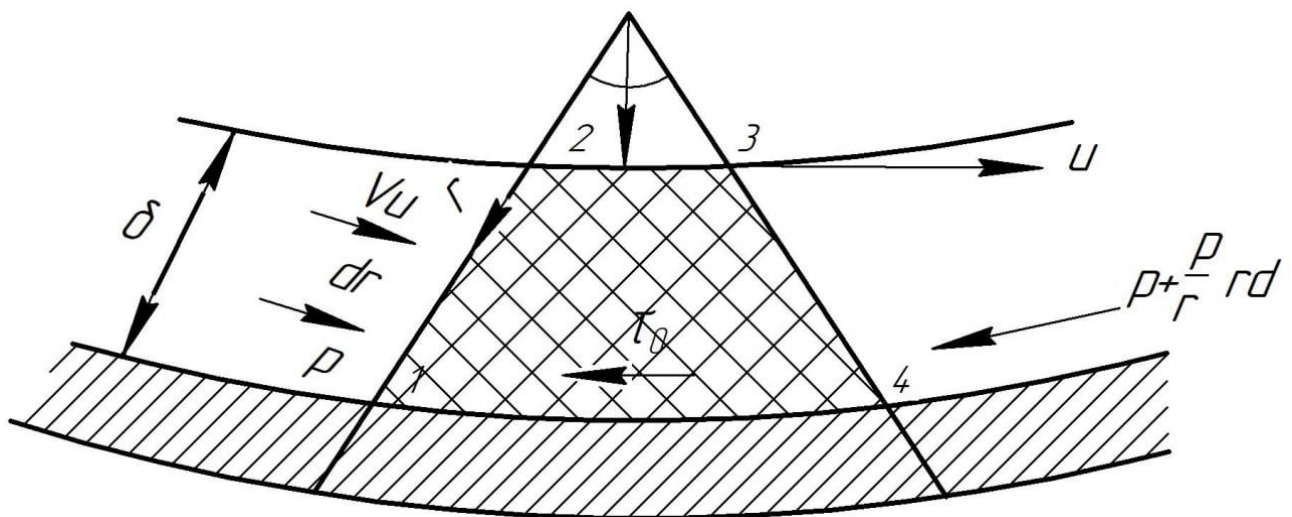


Рисунок 2.4 – Розрахункова схема пограничного шару стінки стакану

Приймемо рух в стакані що встановився, тоді теорема про зміну кількості руху буде виглядати наступним чином:

$$\int_S \rho V V_h dS = \Sigma \bar{F} \quad (2.87)$$

Знайдемо зміни кількості руху виділеного об'єму в напрямку осі u

$$\int_S \rho V_u V_h dS \quad (2.88)$$

Через 1-2 пройде кількість рідини:

$$m_{1-2} = \int_0^\delta \rho V_u dr \quad (2.89)$$

Через 3-4 пройде кількість рідини:

$$m_{3-4} = \int_0^s \rho \left(V_u + \frac{\partial V_u}{r \partial \theta} r d\theta \right) dr \quad (2.90)$$

Кількість рідини, що виходить з об'єму 1234:

$$\Delta m = m_{3-4} - m_{1-2} = \int_0^\delta \rho \frac{\partial V_u}{\partial \theta} r d\theta dr = \frac{\partial}{r \partial \theta} r d\theta \int_0^\delta \rho V_u dr \quad (2.91)$$

В силу нерозривного руху, через межу 2-3 увійде такаж кількість рідини с кількість руху

$$K_{2-3} = -U_0 \frac{\partial}{r \partial \theta} r d\theta \int_0^\delta \rho V_u dr \quad (2.92)$$

де U_0 – кружна швидкість на верхній границі пограничного шару при $r=r_0$;

Знак мінус відповідає приросту кількості руху, плюс - зменшенню

Кількість руху, яка входить через 1-2

$$K_{1-2} = \int_0^\delta \rho V_u^2 dr = F(U) \quad (2.93)$$

Тоді кількість руху, яке виходить з об'єму в напрямку U можна визначити, давши повне приріст функції $F(U)$ в напрямку U .

$$\Delta K_u = [F(U)]du = \frac{\partial}{r\partial\theta} rd\theta \int_0^\delta \rho V_u^2 dr \quad (2.94)$$

Отже

$$\rho V_u V_a dS = \frac{\partial}{r\partial\theta} rd\theta \int_0^\delta \rho V_u^2 dr - U \frac{\partial}{r\partial\theta} rd\theta \int_0^\delta \rho V_u dr \quad (2.95)$$

Визначимо сили, що діють на виділений об'єм в проекціях на U .

$$\sum \bar{F}_u = F_{(1-2)u} + F_{(2-3)u} + F_{(3-4)u} + F_{(1-4)u} + G_{u.v} \quad (2.96)$$

$$F_{(1-2)u} = p \int_0^s dr = p\delta \quad (2.97)$$

Приймемо, що верхня межа пограничного шару лежить на концентричній окружності, тоді проекція рівнодіючий $F(2-3)$ на напрямок U і буде рівна нулю.

$$F_{(2-3)u} = 0 \quad (2.98)$$

$$F_{(3-4)u} = P \left(+ \frac{\partial p}{r\partial\theta} rd\theta \right) \delta \quad (2.99)$$

$$F_{(1-4)u} = (r + dr)d\theta\tau_0 \quad (2.100)$$

$$G_{u.v} = 0 \quad (2.101)$$

Тоді

$$\sum F_u = P\delta - P\delta - \delta \frac{\partial P}{r\partial\theta} rd\theta - \tau_0 d\theta \cdot r - \tau_0 d\theta dr \quad (2.102)$$

Нехтуючи останнім членом, отримаємо:

$$\sum F_u = -\tau_0 rd\theta - \delta \frac{\partial P}{r\partial\theta} rd\theta \quad (2.103)$$

Тоді остаточно теорема про зміну кількості руху, застосованого к виділеному об'єму пограничного шару приймає вигляд.

$$\frac{\partial}{r\partial\theta} \int_0^\delta \rho V_u^2 dr - U_0 \frac{\partial}{r\partial\theta} \int_0^\delta \rho V_u dr = -\tau_0 \delta \frac{\partial \rho}{r\partial\theta} \quad (2.104)$$

Окружна швидкість на границі пограничного шару можна виразити через циркуляцію

$$U_0 = \frac{\Gamma}{2\pi r_0} \quad (2.105)$$

де r_0 – можна прийняти рівним внутрішньому радіусу стакану так як товщина пограничного шару δ достатньо мала

Застосувавши рівняння Бернуллі для струменя, що лежить на верхній границі пограничного шару, отримаємо

$$P + \frac{\rho u_0^2}{2} = const \quad (2.106)$$

Проінтегрувавши це рівняння по $du = rd\theta$

$$\frac{\partial P}{rd\theta} + \frac{U}{\rho} \cdot \frac{\partial U}{rd\theta} = 0 \quad (2.107)$$

так як $U_0 = \frac{\Gamma}{2\pi r_0}$ то

$$\frac{\partial U}{rd\theta} = -\frac{\Gamma}{2\pi r_0 \rho} \cdot \frac{\partial}{rd\theta} \left(\frac{\Gamma}{2\pi r_0} \right) = 0 \quad (2.108)$$

На тиск P всередині пограничного шару по нормалі до поверхні тіла (тобто по r) не змінюється, і отже, $P = const$ і $\frac{\partial P}{rd\theta} = 0$ і всередині пограничного шару.

Таким чином інтегральне відношення (2.104) приймає вигляд

$$\frac{\partial}{r\partial\theta} \int_0^\delta \rho V_u^2 dr - U_0 \frac{\partial}{r\partial\theta} \int_0^\delta \rho V_u dr = -\tau_0 \quad (2.109)$$

Слід відзначити, що так як при виведення цього інтегрального відношення застосовувалось ніяких обмежень в відношення швидкості V_u то отже це відношення може бути застосовано як для ламінарного, так і для турбулентних режимів рухів, якщо підставити відповідне значення швидкості V_u . Однак, отримане інтегральне відношення стосовно розглянутого випадку неможна вважати вичерпним, так як при його виведенні не враховувалися відцентрові сили. Тому для більш строгого рішення цієї задачі необхідно розглянути аналогічним чином теорему про зміну кількості руху в напрямку r .

Отримавши, таким чином, друге інтегральне відношення, в якому вже будуть враховані відцентрові сили, необхідно вирішувати систему цих відношень. Природно, що друге співвідношення може опинитися дуже корисним при розгляді задач з великою циркуляцією при турбулентному режимі руху. Однак, враховуючи умови роботи стакана в промисловій установці, де закрутка потоку в стакані незначна, то природне достатньо розглянути випадок ламінарної течії, а отже цілком обґрунтовано можна знехтувати відцентровими силами. Враховуючи наведене вище, отримане інтегральне співвідношення (2.109) буде задовільнять повністю поставленій задачі. Хоч, якщо потребує практика, то можливе розглядання рішення задачі і для турбулентного режиму руху.

Для того, щоб визначити товщину пограничного шару δ і дотичне напруження τ_0 потрібно ще два додаткових співвідношення, в якості яких можна взяти:

- 1) Закон розподілення швидкості V_u по товщині шару;
- 2) рівняння, зв'язані дотичне напруження на поверхні стінки τ_0 з товщиною шару δ .

При складанні першого додаткового рівняння – закону зміни швидкості V_u по висоті шару r виразимо V_u через r наступний рівняння третього ступеня:

$$V_u = a + br + cr^2 + dr^3 \quad (2.110)$$

де $a, b, c, i d$ – невідомі поки коефіцієнти;

Прийmemo значення $r=r_0$ за початок відліку для пограничного шару, тоді граничні умови будуть мати наступний вигляд:

1. Так як у стінки, тобто при $r=\delta$ швидкість рівна нулю $(V_u)_r = \delta = 0$;
2. При $r=r_0$, або згідно прийнятому позначенню при $r=0$ швидкість V_0 отже $(V_u)_r = 0 = U_0$;
3. Так як при r_0 градієнт швидкості дорівнює нулю, Сила внутрішнього тертя, визначається по закону Ньютона $\tau = -\mu \frac{\partial V_u}{\partial r}$ обертається в нуль. Тому $\left(\frac{\partial V_u}{\partial r}\right)_{r=0} = 0$;
4. Для визначення четвертої граничної умови звернемось к диференційним рівняння пограничного шару в циліндричній системі координат.

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{rd\theta} + \partial \frac{\partial^2 V_u}{\partial r^2} = V_u \frac{\partial U}{rd\theta} + V_r \frac{\partial V_u}{\partial r} \\ \frac{\partial V_u}{rd\theta} + \frac{\partial V_r}{\partial r} = 0 \end{array} \right\} \quad (2.111)$$

З першого рівняння системи випливає, що при $r=\delta$:

$$\left(\frac{\partial^2 V_u}{\partial r^2}\right)_{r=\delta} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{rd\theta} \quad (2.112)$$

(так як $r=\delta$ швидкості $V_u = V_r = 0$).

Але, так як в даному випадку $\frac{\partial p}{rd\theta} = 0$, отже і $\left(\frac{\partial^2 V_u}{\partial r^2}\right)_{r=\delta} = 0$.

Враховуючи наведене вище, для визначення коефіцієнта можна скласти наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} O = a + b\delta + c\delta^2 + d\delta^2 & (V_u)_r = \delta = 0 \\ U_r = a & (V_u)_r = 0 = U_0 \\ O = b & \left(\frac{\partial V_u}{\partial r}\right)_{r=\delta} = 0, \\ O = 2c + 6d\delta & \left(\frac{\partial^2 V_u}{\partial r^2}\right)_{r=\delta} = \delta = 0 \end{cases} \quad (2.113)$$

Звідки:

$$a = U_0 \quad (2.114)$$

$$b = 0 \quad (2.115)$$

$$c = -\frac{3U_0}{2\delta^2} \quad (2.116)$$

$$d = \frac{U_0}{2\delta^3} \quad (2.117)$$

Отже, закон розподілу швидкості $V_u = V_u(r)$ приймає наступний вигляд:

$$V_u = U_0 \left[1 - \frac{r^2(3\delta+r)}{2\delta^3} \right] \quad (2.118)$$

Друге додаткове співвідношення знайдене, використовуючи закон Ньютона для внутрішнього тертя (при ламінарній течії).

$$\tau_0 = \mu \left(\frac{\partial V_u}{\partial r} \right)_{r=\delta}, \quad (2.119)$$

Враховуючи отриману залежність для швидкості V_u отримаємо

$$\frac{\partial V_u}{\partial r} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{U_0}{\delta^3} \cdot r(2\delta + r), \quad (2.120)$$

Тоді:

$$\left(\frac{\partial V_u}{\partial r} \right)_{r=\delta} = -\frac{9}{2} - \frac{U_0}{\delta} = -4,5 \frac{U_0}{\delta}, \quad (2.121)$$

Після підстановки в інтегральне співвідношення (2.109) знайдених виразів для швидкості V_u і дотичного напруження τ_0 отримаємо диференційне рівняння, яке містить одну невідому величину δ розв'язуючи яке знайдемо $\delta = \delta(u)$.

Обчислимо окремо значення інтегралів:

$$\int_0^\delta \rho V_u dr = \int_0^\delta \rho U_0 \left[1 - \frac{r^2(3\delta+r)}{2\delta^3} \right] dr = \int_0^\delta \rho U_0 dr - \int_0^\delta \rho \frac{U_0 \cdot r^2 \cdot 3\delta}{2\delta^3} dr - \int_0^\delta \rho \frac{U_0 r^3}{2\delta^3} dr = \rho U_0 \delta - \frac{\rho U_0}{2} - \frac{\rho U_0 \delta}{8} = \frac{3}{8} \rho U_0 \delta, \quad (2.122)$$

$$\begin{aligned} \int_0^\delta \rho V_u^2 dr &= \int_0^\delta \rho U_0^2 \left[1 - \frac{r^2(3\delta+r)}{2\delta^3} \right]^2 dr = \\ 12 \int_0^\delta \rho U_0^2 \left[1 - \frac{r^2(3\delta+r)}{\delta^3} + \frac{r^4(3\delta+r)^2}{4\delta^6} \right] dr &= \int_0^\delta \rho U_0^2 dr - \int_0^\delta \rho U_0^2 \frac{r^2(3\delta+2)}{\delta^3} dr + \\ \int_0^\delta \rho U_0^2 \frac{r^4(9\delta^2+6\delta r+r^2)}{4\delta^6} dr &= \rho U_0^2 \int_0^\delta -\frac{\rho U_0^2}{\delta^3} \left(\frac{3\delta r^3}{3} + \frac{r^4}{4} \right) \int_0^\delta + \frac{\rho U_0^2}{4\delta^6} \left(\frac{9\delta^2 r^5}{5} + \frac{6\delta r^6}{6} + \right. \\ \left. \frac{r^7}{7} \right)_0^\delta &= U_0^2 \delta - \rho U_0^2 \delta - \frac{\rho U_0^2 \delta^2}{4} + \frac{9\rho U_0^2 \delta}{20} + \frac{\rho U_0^2 \delta}{4} + \frac{\rho U_0^2 \delta}{28} = \frac{6}{10} \rho U_0^2 \delta, \end{aligned} \quad (2.123)$$

Підставляючи ці значення інтегралів в співвідношення (2.109) отримаємо диференційне рівняння:

$$\frac{\partial}{r\partial\theta} \cdot \frac{6}{70} \rho U_0^2 \delta - U_0 \frac{\partial}{\partial\theta r} \frac{3}{8} U_0 \delta = 4,5\mu \frac{U^0}{\delta} \quad (2.124)$$

Замінюючи $r d\theta$ на du і спрощуючи, отримаємо:

$$-\frac{91}{280} \frac{d}{du} \rho U_0 \delta^2 = 4,5\mu \quad (2.125)$$

$$\frac{81}{280} \rho d(U_0 \delta^2) = 4,5\mu dU \quad (2.126)$$

Проінтегрувавши, отримаємо:

$$\frac{81}{280} \rho U_0 \delta^2 = -4,5\mu u + c \quad (2.127)$$

Звідки товщина пограничного шару:

$$\delta = 1,86 \sqrt{\frac{c-4,5\mu}{\rho} \cdot \frac{u}{u_0}} \quad (2.128)$$

де u – це не окружна швидкість, а координата в напрямку $u = rd\theta$.

Отже, товщина граничного шару залежить від розташування точки на окружності. Враховуючи, що рух в розглянутому випадку усталене і симетрично відносно осі, то очевидно товщина граничного шару не повинна залежати від U . Крім того, в цю формулу входять постійна інтегрування, яка може бути визначена шляхом експерименту через недостачу граничних умов (за жодного значення U нам невідомо товщина δ). Тому для практичних задач визначення товщини граничного шару можна рекомендувати формулу:

$$\delta = 1,86 \sqrt{\frac{c_1-4,5\mu}{\rho} \cdot \frac{1}{U_0}} \quad (2.129)$$

Тут по наведеним вище міркувань виключена координата U , но проте введена нова постійна C_1 , для визначення якої треба провести спеціальне експериментальне дослідження.

Спробуємо вирішити поставлену нами задачу в першому наближенні, опираючись на дослідження по визначенню товщини пограничного шару, проведеними інших авторів для випадка осьового руху рідини в трубах.

Для визначення товщини ламінарного пограничного шару скористуємось формулою:

$$\delta = \frac{ND\sqrt{8}}{Re\sqrt{\lambda}} \quad (2.130)$$

де N – число Нікурадзе, аналогічно числу Рейнольдса, рівне 10,5 - 11;

D – діаметр труби або, в нашому випадку, стакані;

Λ – коефіцієнт опору, який для ламінарного режиму можна визначити за формулою:

$$\lambda_l = \frac{64}{Re} \quad (2.131)$$

Отже, дотичне напруження на стінки буде рівним:

$$\tau_0 = 4,5\mu \frac{U_0}{\delta} = 4,5\mu \frac{U_0 Re \sqrt{\lambda}}{Nd\sqrt{8}} = 1,59\mu \frac{U_0 Re \sqrt{\lambda}}{ND} \quad (2.132)$$

Визначимо повну силу опору тертя, яка діє на рідину з сторони стінок стакану. Так як в нашому випадку напруження не змінюється по окружності і висоті стакану, то, очевидно, гальмівна сила буде рівна:

$$F_T = \tau_0 \cdot s = \tau_0 \cdot \pi D H \quad (2.133)$$

де H – висота рідини в стакані.

Отже, момент прикладений зі сторони стінок стакану до рідини буде дорівнювати:

$$\mu_\Gamma = F_T \cdot \frac{D}{2} = \tau_0 \pi H \frac{D^2}{2} = \frac{a^8}{N} \cdot \pi \sqrt{\lambda} \cdot \mu \cdot Re \cdot U_0 \cdot H \cdot D \quad (2.134)$$

Таким чином, враховуючи рівняння (2.83, 2.86, 2.134), можна запропонувати формулу для визначення циркуляції Γ в стакані в залежності від підведеного моменту μ .

$$\Gamma = \frac{\mu}{H \left(0.125 \rho D^2 + \frac{0.8}{N} \sqrt{\lambda} \cdot \mu \cdot Re \right)} \quad (2.135)$$

Для визначення моменту, який має рідина яка надходить в стакан в промислових установках, необхідно провести спеціальне дослідження. Так як для цього треба знати не тільки кількість рідини що надходить, але і нерівномірність швидкостей та кут під яким рідина потрапляє в стакан.

При експериментальних дослідження це питання тепер вирішується просто. Достатньо підвести за допомогою сопел рідину дотичною до внутрішньої окружності стакана. Природньо, що тоді момент буде рівним.

$$\mu = \rho q V \cdot r_0 \quad (2.136)$$

де V – швидкість на виході з сопла; q – витрата через сопла.

Отже, якщо рух в стакані встановившись ($q=const$), то знаючи швидкість потоку на виході з сопла V можна по формулі (2.136) визначити циркуляцію в стакані. Швидкість V нескладно визначити за рівнянням Бернуллі, знаючи діаметр сопла, витрата через нього и тиск.

$$\frac{P}{J} = \frac{V^2}{2g} \quad (2.137)$$

$$V = \sqrt{\frac{2P}{\rho}} \quad (2.138)$$

де $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ – густина води.

2.4 Висновки до розділу 2

Було показано, що під час руху краплин золю в газовій фазі, градієнт швидкості впливає на збільшення внутрішньої циркуляції рідкої краплі. Розроблена модель формує фундаментальну основу взаємозв'язку між циркуляційними потоками в дисперсній краплині і інтенсифікацією

масообмінних процесів, оскільки були усунені наступні прогалини в гідродинаміці і стабільності краплин рідини в газовому потоці:

По-перше, проведено теоретичне обґрунтування та експериментальне підтвердження можливості інтенсифікації масообмінних процесів за рахунок збільшення градієнта швидкості потоку газу. Подруге, запропоновано загальну залежність від розгляду нелінійного розподілу швидкості разом з радіусом крапель. Нарешті, досліджено вплив внутрішніх циркуляційних потоків в краплині на стабільність її руху в вихровому потоці газу.

Більш того, обґрунтовано фізико-математичні моделі руху рідкого крапельного струменя в газовому потоці з точки зору впливу градієнта швидкості на циркуляційні потоки в крапельці. В цілому отримані результати дозволяють сформулювати основи підвищення ефективності і продуктивності масообмінних процесів і грануляційного та масообмінного обладнання відповідно. Ці результати також дозволяють вибрати умови експлуатації і забезпечити найбільш перспективну технологію реалізації правильної організації газо-рідких потоків в апараті масової передачі.

В ході розгляду руху частинок з урахуванням сили Басе було обґрунтовано її дробове походження. В результаті модифікації рівняння руху частинок, що рухається з різною швидкістю в часі, було отримано рівняння дробового порядку осадження частинок. Це рівняння відрізняється від традиційного половинною похідною швидкості частинки.

В результаті інтеграції запропонованого рівняння його загальне рішення було знайдено аналітично. Це рішення відрізняється від традиційного компонентом на основі модифікованої функції Мітгаг-Лефлера. Для конкретного випадку нульової сили Басе це рівняння зводиться до традиційного. Більш того, теоретично була доведена приналежність цього рішення до реального діапазону значень.

Диференціальне рівняння дробового порядку осадження частинок вирішувалося чисельно за допомогою аналогічного інтегрального рівняння дробового порядку. Чисельне моделювання здійснювалося на основі методу

S-наближення з використанням блок-імпульсної операційної матриці. Для нормалізації отриманих рішень була введена безрозмірна швидкість частинок.

В результаті графічно були представлені наближення чисельно отриманих результатів досліджень для одного параметра змінної безрозмірної системи від 0 до 1. Отримані аналітичні залежності наближалися до відповідних кривих блок-імпульсу. Адекватність запропонованого аналітичного підходу для розв'язання диференціального рівняння седиментації частинок була доведена аналітично і чисельно.

Примітно, що сила Бассета значно збільшує час осадження. Наприклад, якщо сила Бассета не розглядається, то час осадження дорівнює 3,0. Однак при врахуванні сили Басе з безрозмірним параметром, рівним 0,05, цей час збільшується на 43%.

В ході розгляду витікання стисненого струменя через отвір з урахуванням нахилу отвору та попередньої циркуляції запропонована математична модель для визначення коефіцієнта витрати рідини через отвір, що враховує попередні фактори.

Слід зазначити, що дана математична модель дозволяє визначити товщину пограничного шару, циркуляцію та витрату рідини через отвір, та враховує швидкість руху рідини в отворі та момент прикладений зі сторони стінок стакану до рідини.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З РЕЖИМНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ТА АПАРАТУРНО-КОНСТРУКТИВНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛОУТВОРЕННЯ ЗА ЗОЛЬ-ГЕЛЬНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ

3.1 Фізико-механічні властивості гранул двоокису алюмінію

Напрацювання гранул каталізатору двоокису алюмінію проводилось на експериментально-дослідній установці (підрозділ 1.3.1). В першій серії досліджень було проведено 8 (таблиця 3.1) експериментів при витраті золю $2,37 \cdot 10^6$ м³/с, густина золю становила 1208 кг/м³. У перших двох експериментах діаметр отворів диспергатору становив 1,4 мм а частота коливань – 100 Гц, при цьому кількість ПАР, доданого до золю становила 2 - 5 мл. Діаметр отриманих гранул двоокису алюмінію становив 2,0 – 2,55 мм, насипна густина після сушки гранул – 0,37 - 0,4 кг/м³., а після прокалювання – 0,34-0,39 кг/м³. Також для даних зразків гранул була визначена їх міцність, як і зазначалось в підрозділі 1.1 за методикою описаною в [1, 2, 4], що становила 1,2 - 1,9 кг/гран.

В експерименті під номером 3 діаметр отворів становив 1,2 мм, а кількість ПАР – 2 мл, частота коливань – 68 Гц. Слід зазначити, що в даному досліді була виміріна довжина нерозривного струмею – 65 мм. В результаті були отримані гранули діаметром 2,0 – 2,2 мм, а їх насипна густина після сушки становила 0,37 - 0,41 кг/м³.

В четвертому експерименті діаметр отворів та кількість ПАР не змінювались, а частоту коливань зменшили до 40 Гц. Довжина нерозривного струмею становила 35 - 40 мм. Діаметр гранули каталізатора становив 2,0 – 2,4 мм, а їх насипна густина після сушки становила 0,38 - 0,40 кг/м³.

При проведенні п'ятого експерименту частоту коливань збільшили до 70 - 80 Гц, а кількість ПАР збільшили до 12 мл, при цьому в золь додали воду в кількості 40 мл. Довжина нерозривного струмею при даних робочих умовах - 20 - 30 мм. Діаметр гранули каталізатора становив 2,0 – 2,2 мм, а їх насипна густина після сушки становила 0,35 - 0,39 кг/м³.

В шостому експерименті діаметр отворів становив 1,0 мм, а частота коливань 48 Гц. При таких параметрах було отримано полідисперсний склад гранул 1,2 – 3 мм. Тому було вирішено збільшити частоту коливань у наступному експерименті до 100 Гц. При даній частоті та додаванні 12 мл ПАР до золю, довжина нерозривного струменя склала 20 мм, вдалося отримати гранули діаметром 1,2 – 2,2 мм з насипною густиною після сушки 0,35 – 0,37 кг/м³.

У восьмому експерименті діаметр отворів диспергатора – 0,85 мм, частота коливань – 100 Гц, кількість ПАР – 8 мл, кількість води – 90 мл. В ході диспергування довжина нерозривного струменя складала – 45 мм. Діаметр отриманих гранул при даних параметрах роботи установки – 1,2 – 2,0 мм, при цьому більшість гранул двоокису алюмінію монодисперсні з діаметром 1,6 мм. Насипна густина після сушки гранул становила 0,37 - 0,40 кг/м³, а після прокалювання - 0,34 - 0,36 кг/м³. Також була визначена міцність гранул, що склала 0,846 кг/гран.

Таблиця 3.1 – Результати першої серії дослідів з напрацювання гранул двоокису алюмінію.

№ експ.	Діаметр отв., мм	Довжина голок, мм	Частота Гц	Насипна густина, кг/м ³		d гранул осн. фракції, мм
				після сушки	після прокалювання	
1	2	3	4	5	6	7
1	1,4	27	100	0,37/0,39	0,34/0,36	2,5
2	1,4	27	100	0,37/0,40	0,37/0,39	2,0-2,55
3	1,2	28	68	0,37/0,41		2,0-2,2
4	1,2	28	40	0,38/0,40		2,0-2,4
5	1,2	28	70-80	0,35/0,39		2,0-2,2
6	1,0	31	42			1,2-3,0
7	1,0	32	100	0,35/0,37		1,2-2,2
8	0,85	33	100	0,37/0,40	0,34/0,36	1,2-2,0(1,6)

В ході проведення другої серії дослідів визначався вплив концентрації кислоти та відношення порошок - кислота ($\text{Al(OH)}_3:\text{HNO}_3$) на міцність та насипну густина гранул після прокалювання. Так було проведено 8 експериментів, в яких діаметр отворів диспергатора становила 1,0 мм, частота

обертання – 30 об/хв, частота коливань – 60 Гц. Також було проведено додатковий експеримент, на більш інтенсивному гідродинамічному режимі, в якому діаметр отворів становив – 0,8 мм, частота обертання – 60 об/хв, частота коливань – 90 Гц. Результати експериментів зведені до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати другої серії дослідів з напрацювання гранул двоокису алюмінію.

№ експ.	Конц. кислоти, н	Відношення порошок:кислота	d гранул осн. фракції, мм	Насипна густина, кг/м ³	Міцність, кг/гран
1	0,476	1:2	2,5-3,0	318	1,5
2	0,445	1:2	2,0-2,2	371	1,2
3	0,428	1,05:2	2,5-3,0	356	1,5
4	0,483	1,05:2	2,0-3,0	375	1,8
5	0,467	1,05:2	2,0-2,5	370/358	1,2
6	0,43	1:2	2,0-2,5	360/353	1,2
7	0,43	2,0:3,5	2,0-2,5	372/354	1,0
8	0,415	2,0:3,66	2,0-2,5	373	1,1
9	0,43	1:2	1,7-1,8	371	1,2

3.2 Витікання через отвір при стисканні струменя з урахуванням нахилу отвору та циркуляції перед отвором

Як було зазначено вище, метою експерименту було визначення коефіцієнта витрати M для різних значень чисел Рейнольдса Re (або для висот стовпа рідини в стакані) за різних умов витікання.

Коефіцієнт витрати μ можна уявити:

$$\mu = \frac{Q_d}{Q_t} \quad (3.1)$$

де Q_d – дійсні витрати через отвір; Q_t – теоретична витрата через отвір.

Дійсна витрата визначається об'ємним способом. Знаючи обсяг мірного бачка – W та час його наповнення t можна визначити витрату рідини через отвір:

$$Q_d = \frac{W}{t} \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{сек}} \quad (3.2)$$

де W – об'єм мірного бачка, л;

t – час наповнення мірного бачка, с;

Теоретична витрата визначається за формулою:

$$Q = \mu_T \cdot F_o \cdot \sqrt{2gH} \quad (3.3)$$

де μ_T – теоретичний коефіцієнт витрати, який за відсутності втрат дорівнює 1;

F_o – площа отвору, м^2 ;

H – висота стовпа рідини над затверджувачем, м;

Що до досліджень із циркуляцією, то тут, як зазначалося раніше, загальноприйняті критерії витікання не підходять. Якщо число Рейнольдса передбачається визначити за такою формулою:

$$Re = \frac{v_{ub} \cdot d}{\nu} \quad (3.4)$$

То невідомо, як визначити теоретичну витрату, а саме: яку підставити площу F_o в формулу (1.1) визначення теоретичного витрати. Тут можна вчинити по-різному. Наприклад, можна за F_o умовно приймати площу отвору. Тоді при високих циркуляціях, коли витрата через отвір прагнучиме нулю, очевидно коефіцієнт витрати прагнучиме нескінченності, так як, величина теоретичної витрати завжди залишатиметься кінцевою величиною (при $H > 0$). Отже, таке завдання F_o не характеризуватиме течію. Очевидно, в якості площі F_o доцільно

приймати кільцеву площу, утворену стінками отворів та поверхні вихору. Тоді зі збільшенням циркуляції, згідно з умовою існування вихору (1.27) діаметр його повинен збільшуватися, отже, кільцева площа зменшуватиметься. Це зменшуватиме як дійсну витрату, так і теоретичну, отже, коефіцієнт витрати завжди залишатиметься кінцевою величиною.

Слід зазначити, що коли вирішена задача про визначення циркуляції в склянці, то визначити діаметр вихору в площині отвору нескладно.

Для цього з умови (1.27) необхідно знайти значення, а потім, знаючи циркуляцію, визначити радіус вихору за формулою:

$$\tau_v = \frac{\Gamma}{2\pi \cdot V_{ub}} \quad (3.5)$$

Пропонований спосіб завдання критеріїв, що характеризують витікання, відрізняється ще й тим, що він опосередковано враховує і натиск над отвором (у той час, як для нормального закінчення натиск над отвором повністю визначає критерій Рейнольдса).

Враховуючи вищевикладене, обрахунок результатів експерименту при витіканні з циркуляцією проводився згідно з пропонованою знахідкою. А саме, циркуляція визначалася за формулою (2.135), число Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_{ub} \cdot d}{\nu} \quad (3.6)$$

де:

$$V_{ub} \cdot d = \frac{\Gamma}{\pi d} \quad (3.7)$$

Дійсна витрата:

$$Q_T = F_o \sqrt{2gH}, \quad (3.8)$$

де:

$$F_o = \frac{\pi}{4}(d^2 - d_B^2) \quad (3.9)$$

$$d_B = \frac{\Gamma}{\pi \cdot V_{uv}} \quad (3.10)$$

Окружна швидкість вихору визначилася за умови (1.27). Коефіцієнт витрати:

$$\mu = \frac{Q_d}{Q_T} \quad (3.11)$$

Для отримання результатів, зручних для практичного застосування, було розраховано поправочні коефіцієнти, які необхідно вводити для уточнення коефіцієнтів витрати μ . Ці коефіцієнти є відношенням коефіцієнта витрати, отриманого дослідним шляхом до коефіцієнта витрати:

$$K\alpha = \frac{\mu_o}{\mu_T} \quad (3.12)$$

Такі графіки побудовані для різних кутів α° (кут нахилу площини отвору до горизонту) та різних відношень d/D (рис. 3.6 - 3.8).

Що ж до досліджень із циркуляцією, то тут було проведено дослідження вибірково, так як замовником не було встановлено діапазон зміни циркуляції, що має місце у промислових установках. Не проведення досліджень всіх можливих значень циркуляції, пов'язані з великими витратами часу. Тому було визначено витрати для кількох значень циркуляцій при різних значеннях H і d/D . Результати зведені в таблицю 1 (Додаток А). Для порівняння в цій же таблиці наведено значення витрат при тих же значеннях H і d/D , але без циркуляції.

Результати експериментальних досліджень наведено на рисунках 3.2-3.5. Аналізуючи отримані результати, необхідно відзначити, що не перебіг відбувається при порівняно малих числах Рейнольдса, що, як відомо, дає велику

невизначеність коефіцієнта μ . У загальному випадку графік зміни коефіцієнта μ в залежності від Re має такий вигляд:

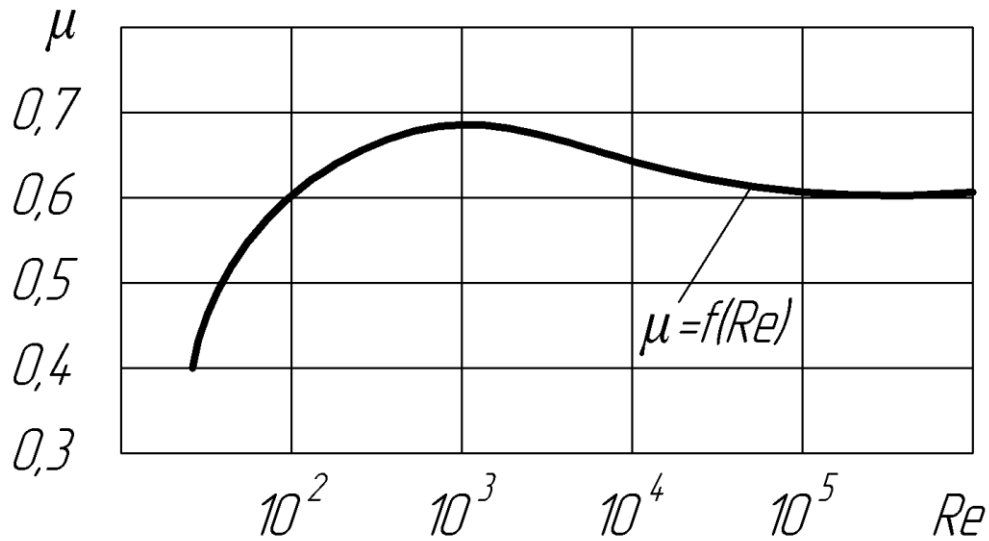


Рисунок 3.1 – Графічна залежність коефіцієнта витрати M від критерію Re

Звідки видно, що коефіцієнт витрати μ практично не змінюється при $Re > 10^5$. При $Re < 10^5$ коефіцієнт μ має складну залежність і визначається за різними рекомендаціями. Закінчення в даному випадку відбувається при цих значеннях $0 < Re < 10^5$. Тому стає ясно, як важливо вибрати залежність, яка давала б хорошу збіжність з експериментом. Як зазначалося, раніше, є багато різних рекомендацій, у цій роботі проводилося порівняння дослідних даних з одним із них [20]. Аналізуючи графіки, зображені на рисунках. 3.2 – 3.5 видно, що дослідні відношення μ відрізняються від розрахункових. Причому коефіцієнт μ також залежить від кута нахилу площини отвору до горизонтальної площини. Отже, розрахунок коефіцієнта за рекомендаціями [20] при $Re < 10^5$ може призвести до похибок. Тому щодо коефіцієнта μ доцільно користуватися поправочними коефіцієнтами, наведеними на рис. 3.6 – 3.8. Слід зазначити, що наведені коефіцієнти мають чинність лише тоді, коли коефіцієнт μ розрахований за рекомендаціями [20]. Тому, щоб точніше визначити значення μ необхідно розрахувати коефіцієнт μ_t (теоретичний) за рекомендаціями [20], а потім помножити його на відповідне значення K_a , взяте з графіків (рисунки 3.6 – 3.8).

$$\mu = K_{\alpha} \cdot \mu_{\tau} \quad (3.13)$$

У цій роботі не було зроблено спроби відшукування нової залежності для визначення залежності для визначення коефіцієнта μ при $Re < 10^5$, так як для цього ще мало експериментального матеріалу. Хоча, як бачимо з вищевикладеного, необхідність у цьому очевидна.

Як показали досліди, наявність циркуляції у склянці (навіть незначною) суттєво позначається на витікання. Це переконливо показано в таблиці 1 (додаток А), в якій наведено дійсні значення витрати при закінченні з циркуляцією і без неї за інших умов.

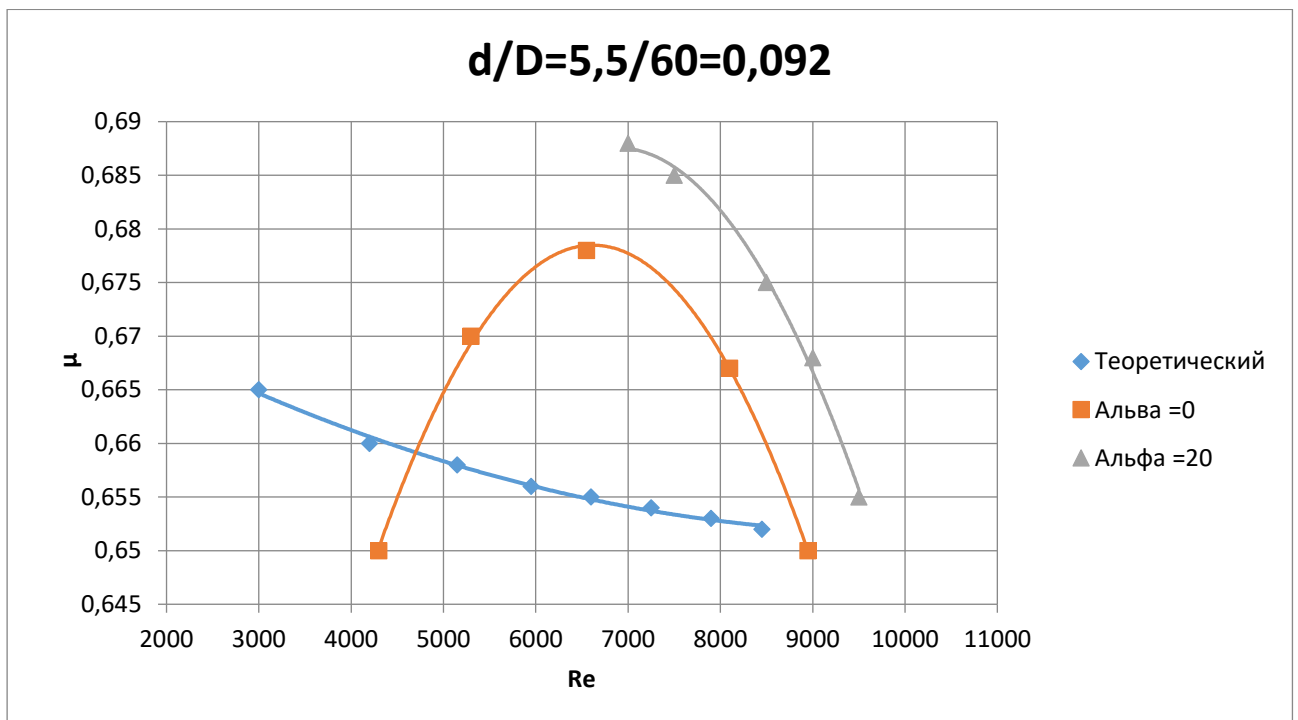


Рисунок 3.2 – Залежність коефіцієнтів витрати рідини (золю) μ через отвір від критерію Re ($2000 < Re < 11000$), при співвідношенні $d/D=5,5/60=0,092$

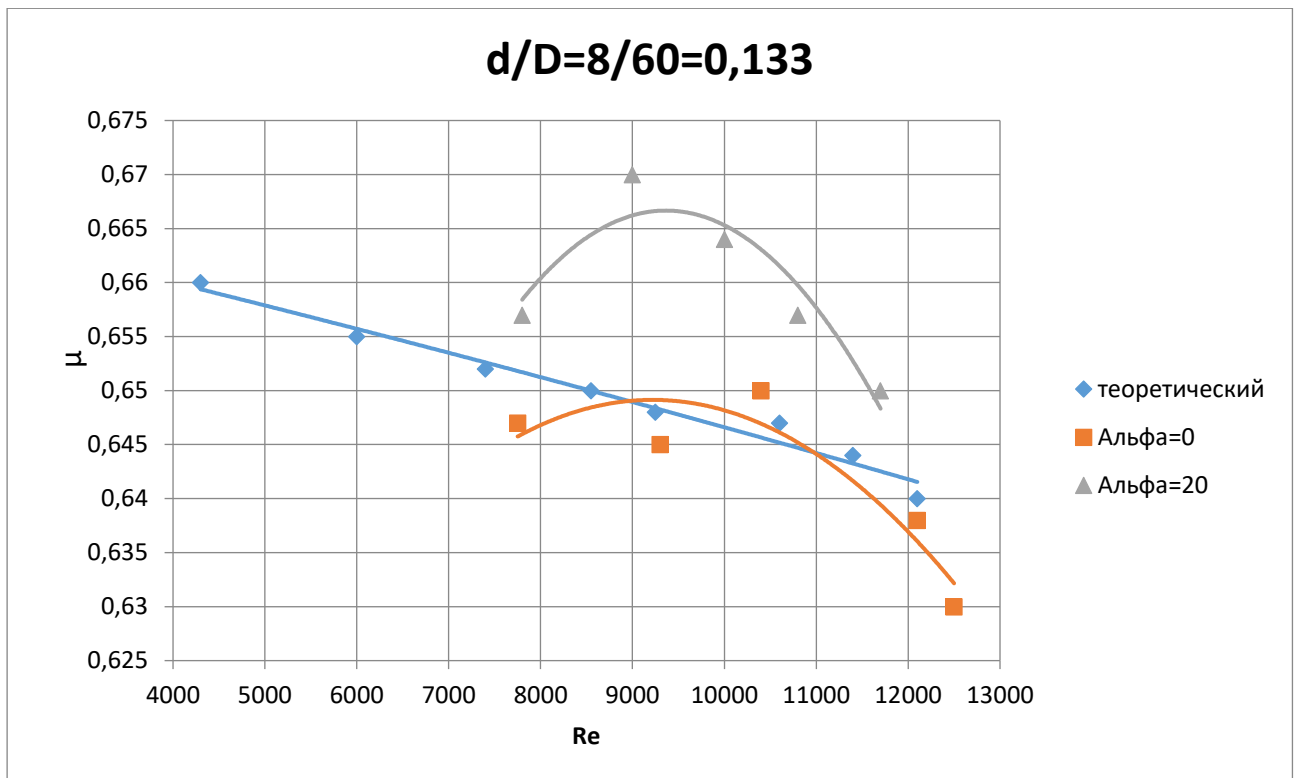


Рисунок 3.3 – Залежність коефіцієнтів витрати рідини (золю) μ через отвір від критерію Re ($4000 < Re < 13000$), при співвідношенні $d/D=8/60=0,133$

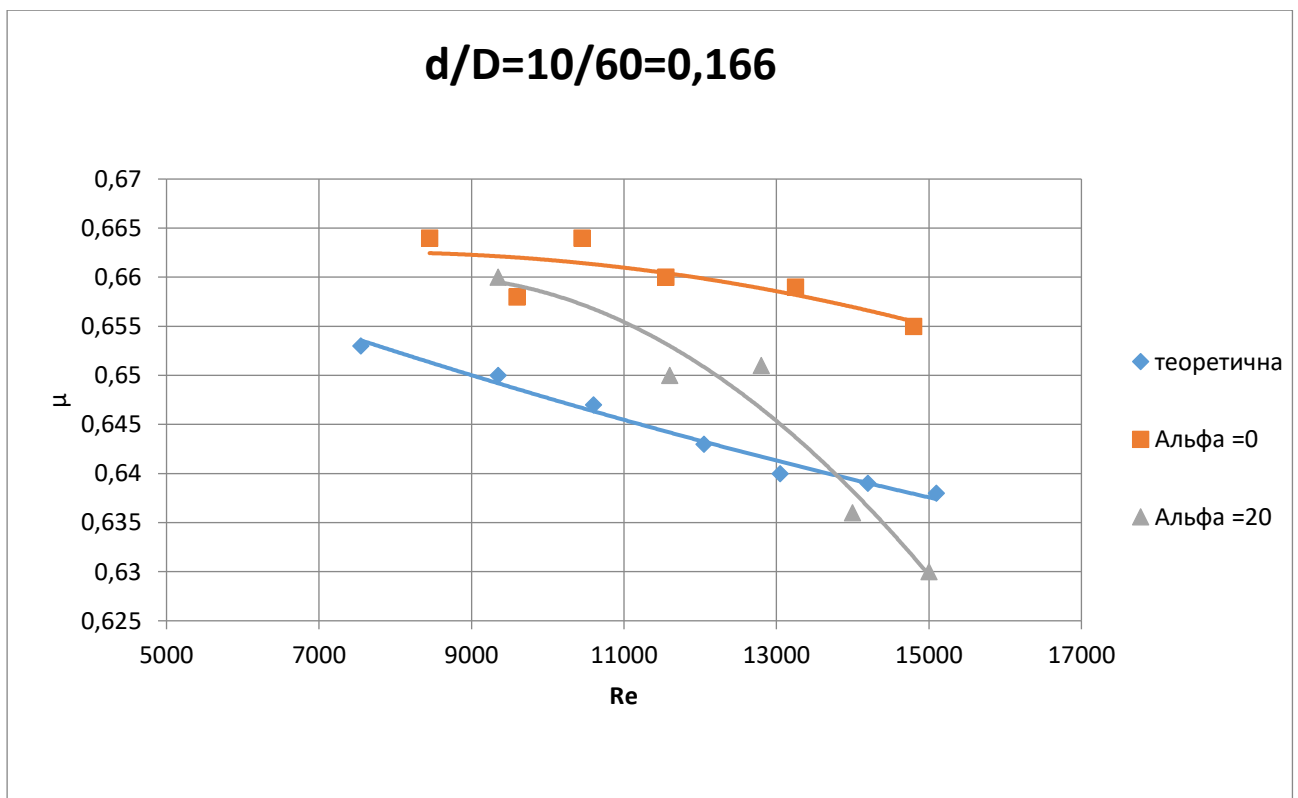


Рисунок 3.4 – Залежність коефіцієнтів витрати рідини (золю) μ через отвір від критерію Re ($5000 < Re < 17000$), при співвідношенні $d/D=10/60=0,166$

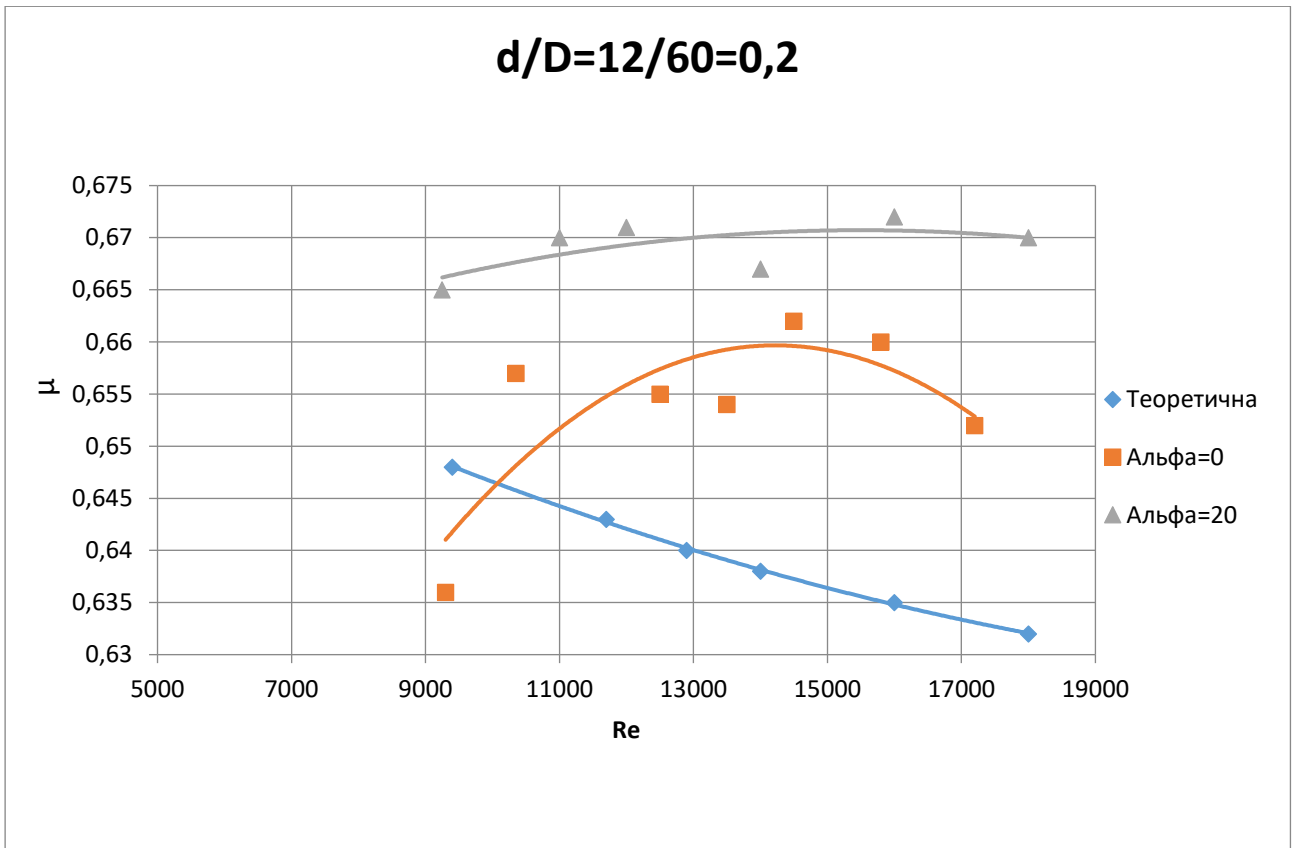


Рисунок 3.5 – Залежність коефіцієнтів витрати рідини (золу) μ через отвір від критерію Re ($9000 < Re < 19000$), при співвідношенні $d/D=12/60=0,2$

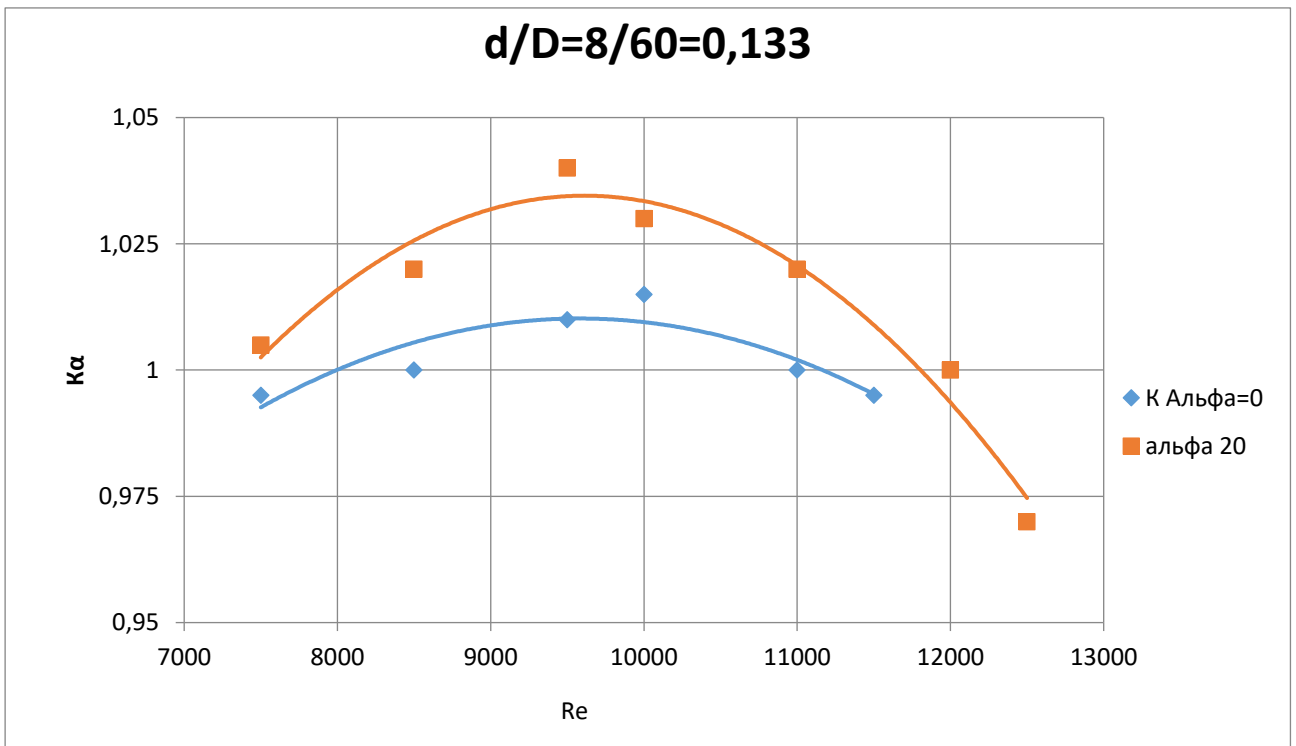


Рисунок 3.6 – Залежність коефіцієнтів витрати рідини (золу) μ через отвір від критерію Re ($7000 < Re < 13000$), при співвідношенні $d/D=8/60=0,133$

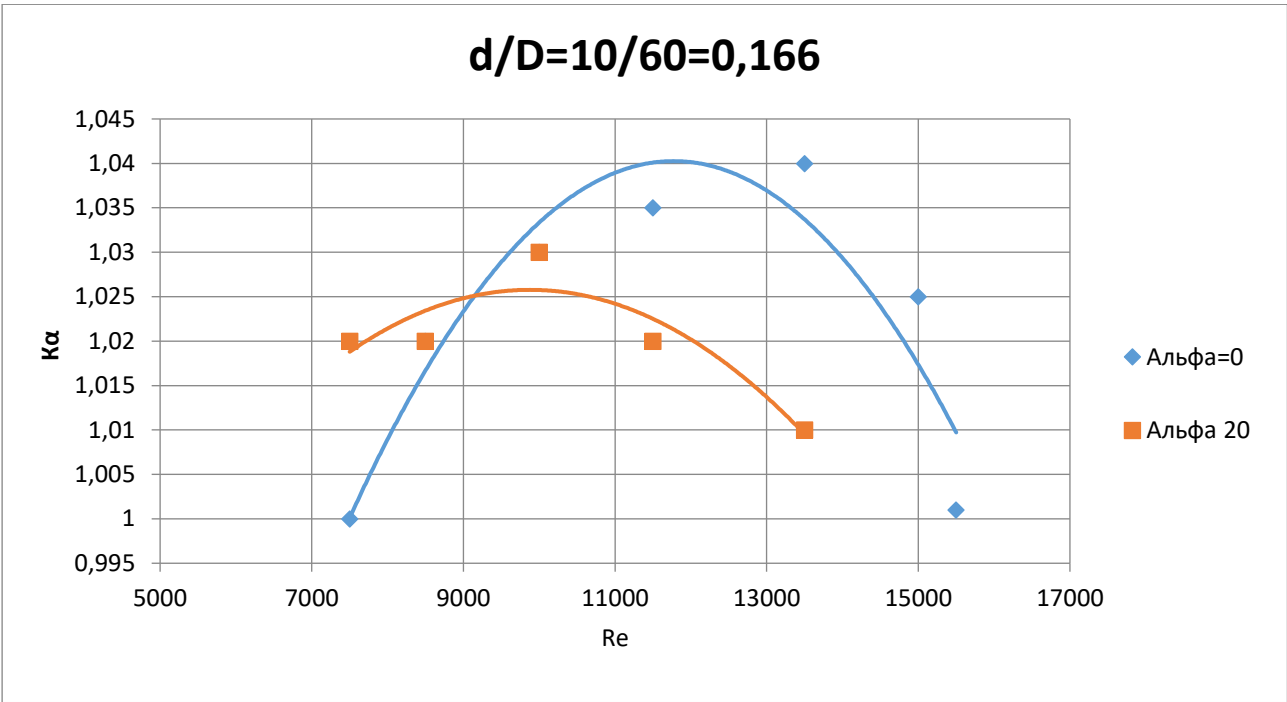


Рисунок 3.7 – Залежність поправочних коефіцієнтів $K\alpha$ від критерію Re ($7000 < Re < 17000$), при співвідношенні $d/D=10/60=0,166$

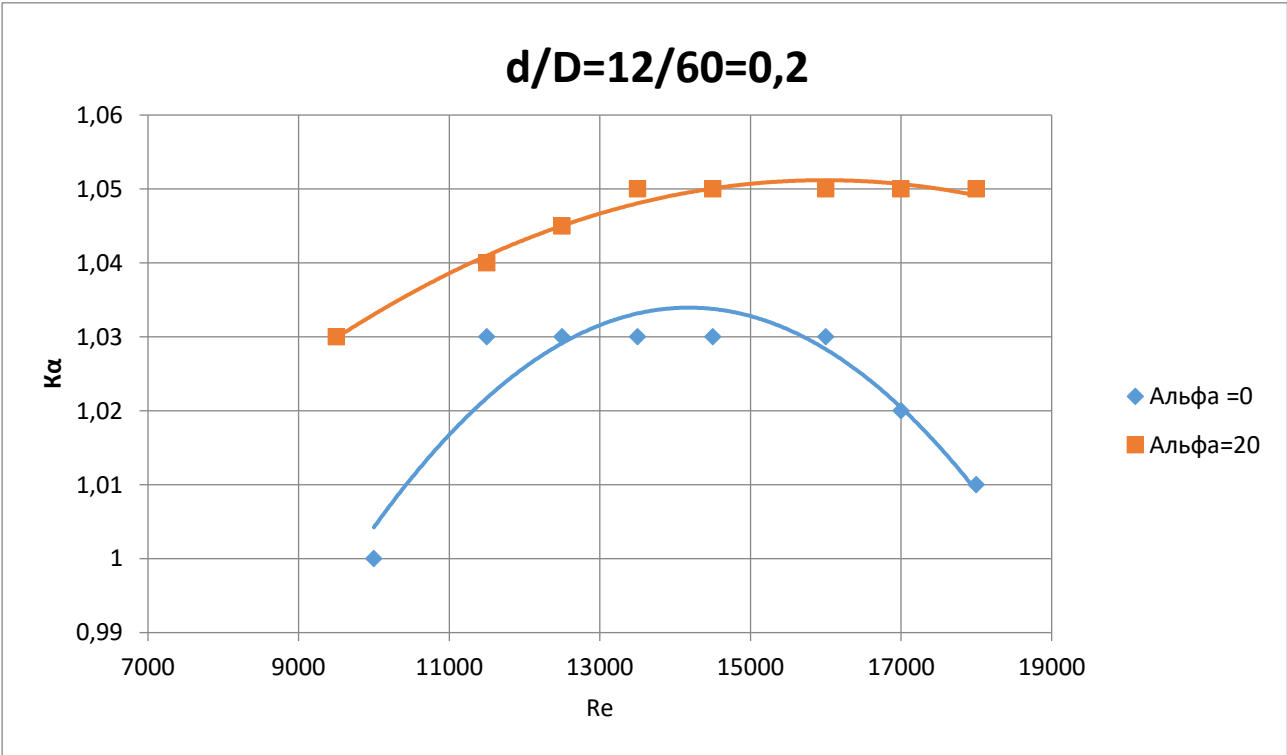


Рисунок 3.8 – Залежність поправочних коефіцієнтів $K\alpha$ від критерію Re ($9000 < Re < 19000$), при співвідношенні $d/D=12/60=0,2$

3.3 Дослідження залежності швидкості переміщення частинок в змійовику промивача

Дослідження залежності швидкості переміщення частинок у змійовику від частоти переміщення діафрагми пульсатора.

При дослідженні були застосовані як рідина, що промиває – вода, частинок, що промиваються – пісок із середнім розміром частинок $d_{\text{п}} = 2,58 \cdot 10^{-4}$ м. В результаті обробки отриманих даних, було отримано графічну залежність середньої швидкості переміщення частинок у змійовику від частоти переміщення діафрагми пульсатора (рис. 3.10).

З графіка видно, що при збільшенні частоти, до деякого значення, середня швидкість руху частинок по змійовику лінійно зростає, при подальшому збільшенні частоти, швидкість руху частинок зменшується. Це пояснюється тим, що при зворотному ході діафрагми пульсатора відбувається зворотний знос гранул на деяку відстань. Отже, залежно від частоти переміщення діафрагм пульсатора, промивач може працювати у двох режимах: режим переміщення гранул і режим інтенсивного перемішування. Режим інтенсивного перемішування можна рекомендувати для часток, схильних до злипання.

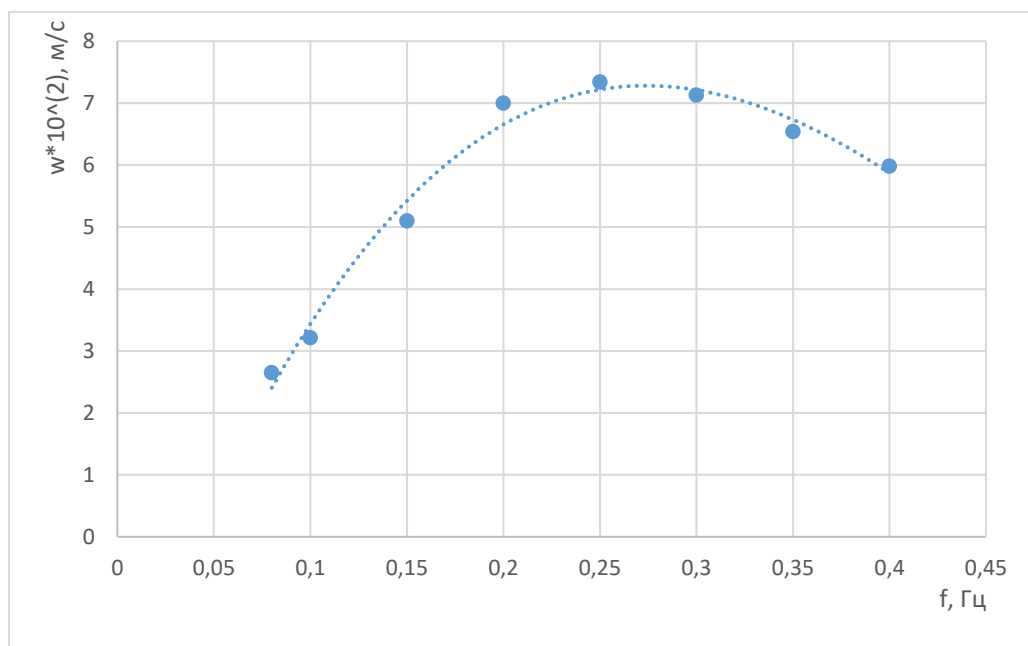


Рисунок 3.9 - Графік залежності середньої швидкості переміщення гель-сфер у змійовику промивача від частоти переміщення діафрагми пульсатора.

Дослідження залежності швидкості переміщення частинок у змійовику промивача від амплітуди переміщення діафрагми пульсатора.

На підставі дослідних даних було побудовано графічну залежність середньої швидкості переміщення частинок у змійовику, від амплітуди переміщення діафрагми (рис 3.11).

З графіка видно, що зі збільшенням амплітуди швидкість переміщення частинок лінійно зростає.

Однак при малих амплітудах переміщення діафрагм пульсатора (в даному випадку 2 мм) спостерігається різке зменшення швидкості руху частинок і забиття змійовика частинками. Це пояснюється тим, що гідроімпульси малої інтенсивності демпфуються рідиною, повітрям, які знаходяться у замкнених порожнинах, тощо. Тому амплітуда переміщень діафрагми пульсатора має бути деякою мінімальною величиною, яка залежить від розмірів пульсатора.

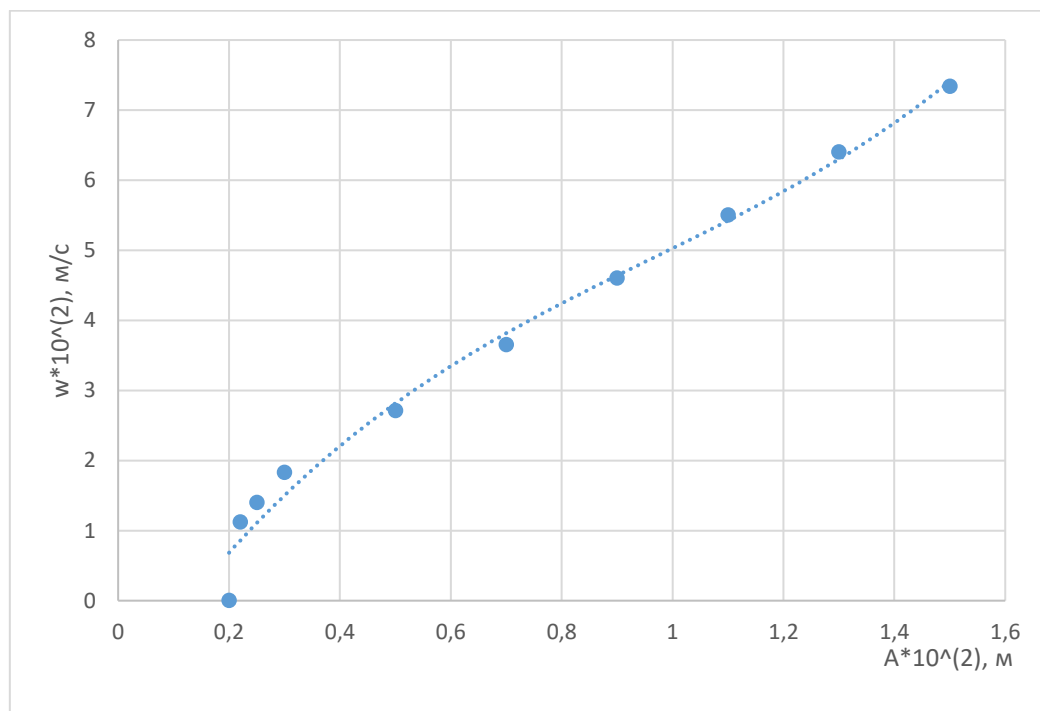


Рисунок 3.10 - Графік залежності середньої швидкості переміщення гель-сфер у змійовику промивача від амплітуди переміщення діафрагми пульсатора

Дослідження залежності швидкості переміщення частинок у змійовику від середнього діаметра змійовика.

В результаті обробки дослідних даних було отримано графічну залежність середньої швидкості переміщення частинок у змійовику, від середнього діаметра змійовика (рис. 3.12). Так як, зміна швидкості незначна, то при розрахунках вплив середнього діаметра на швидкість можна не враховувати.

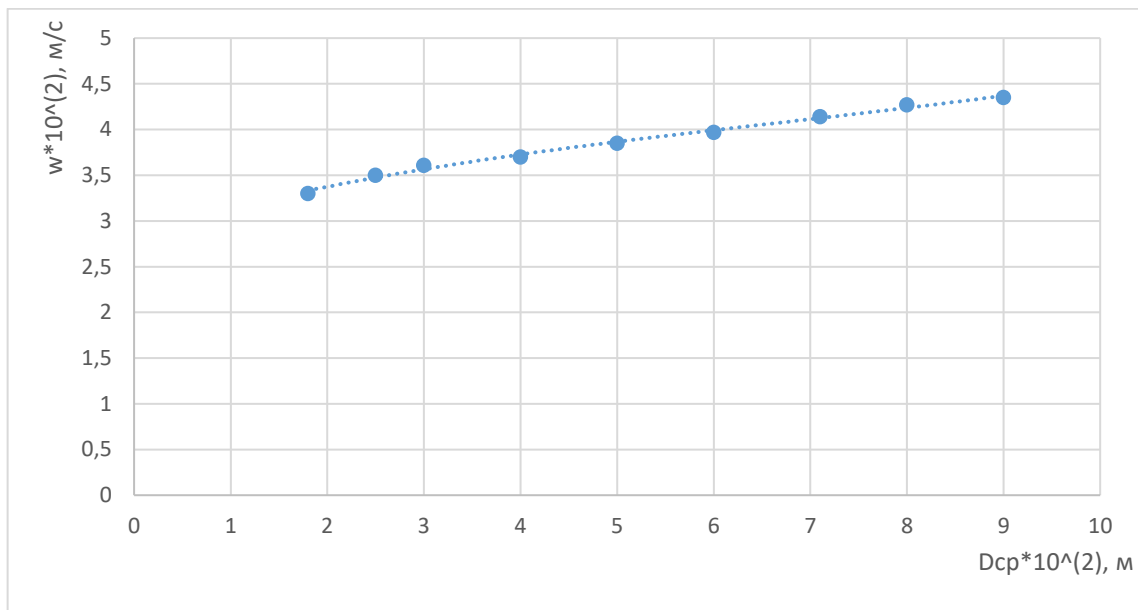


Рисунок 3.11 - Графік залежності середньої швидкості переміщення гель-сфер у змійовику промивача від середнього діаметра змійовика

Дослідження залежності швидкості переміщення частинок у змійовику від ступеня заповнення змійовика гранулами.

Під час дослідження було встановлено, що середня швидкість переміщення частинок залежить від ступеня заповнення змійовика. Однак при $K_3 > 0.4$ спостерігалося відставання нижніх шарів частинок від верхніх. Тому рекомендується проводити промивання при ступенях заповнення менше 0,4.

3.4 Алгоритм розрахунку пульсаційного змійовикового промивача

Таблиця 3.3 - Вихідні дані для розрахунку пульсаційного змійовикового промивача

№	Параметр	Позначення
1.	Продуктивність по гель-сферам	Q
2.	Час промивання	$\tau_{пр.}$
3.	Щільність гель-сфер	Q_r
4.	Насипна щільність гель-сфер	Q_m
5.	Щільність рідини, що промиває	Q
6.	Коефіцієнт витрати рідини, що промиває	K_p
7.	Діаметр гель-сфер	d
8.	Коефіцієнт динаміки в'язкості середовища, що промиває	M
9.	Коефіцієнт завантаження труби змійовика гель-сферами	K_z

Попередньо задаємося довжиною трубки $L_{пр.}$.

Внутрішній діаметр труби змійовика:

$$d_{вн.} = \sqrt[2]{\frac{Q \cdot \tau_{пр.}}{\pi \cdot \rho_n \cdot L_{пр.} \cdot K_B}}, \quad (3.14)$$

де $d_{вн.}$ – внутрішній діаметр труби змійовика.

Приймаємо найближчий по ГОСТ розмір труби $d_{вн.п.}$.

Уточнена довжина труби змійовика:

$$L = \frac{4Q \cdot \tau_{пр.}}{\pi \cdot K_B \cdot d_{вн.п.}^2 \cdot \rho_n}. \quad (3.15)$$

Радіус згину змійовика по середній лінії:

$$R_{\text{ср}} = K_{\Gamma} \cdot d_{\text{н}}, \quad (3.16)$$

де $R_{\text{ср}}$ – радіус згину зміювика по середній лінії;

K_{Γ} – коефіцієнт, що залежить від зовнішнього діаметру труби та товщини її стінки (визначається по довіднику);

$d_{\text{н}}$ – зовнішній діаметр труби зміювика.

Кількість витків зміювика:

$$n = \frac{L}{2\pi R_{\text{ср}}}, \quad (3.17)$$

де n – кількість витків зміювика.

Швидкість руху промивальної рідини в зміювику (швидкість винесення):

$$W_{\text{кр.}} = \sqrt{\frac{d_{\text{н}} \cdot (\rho_{\Gamma} - \rho) \cdot g \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha)}{3\xi\rho}}, \quad (3.18)$$

де $W_{\text{кр.}}$ – швидкість винесення;

α – кут нахилу витка зміювика;

ξ – коефіцієнт опору.

$$\alpha = \arctg \frac{d_{\text{н}}}{D_{\text{ср.}} + d_{\text{н}}}, \quad (3.19)$$

де $d_{\text{н}}$ – зовнішній діаметр труби зміювика.

$$\xi = \frac{4 Ar}{3 Re^2}, \quad (3.20)$$

де Ar – критерій Архімеда,

Re – критерій Рейнольдса.

$$Ar = \frac{d^3 \rho^2 g}{\mu^2} \frac{\rho_r - \rho}{\rho}, \quad (3.21)$$

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0,61 Ar^{0,5}}, \quad (3.22)$$

Середня швидкість руху промивальної рідини в змійовику:

$$\omega_{\text{ср.}} = 0,5 \omega_{\text{max}}, \quad (3.23)$$

де $\omega_{\text{ср.}}$ – середня швидкість промивальної рідини.

$$\omega_{\text{ср.}} = \omega_{\text{кр.}} \quad (3.24)$$

Необхідний напір промивальної рідини:

$$\Delta P = \frac{4\mu L \omega_{\text{кр.}}}{z_{\text{вн.}}^2 - z^2}, \quad (3.25)$$

де: ΔP – напір промивальної рідини;

z – відстань від центру потоку до центру гель-сфери.

$$z = z_{\text{вн.}} - \frac{d}{2}. \quad (3.26)$$

Витрата промивальної рідини:

$$Q_{\text{ж}} = 0,4 \omega_{\text{ср.}} S_{\text{тр.}} (1 - k_3), \quad (3.27)$$

де $S_{\text{тр.}}$ – площа живого перерізу труби змійовика.

$$S_{\text{тр.}} = \frac{\pi d_{\text{вн.}}^2}{4}, \quad (3.28)$$

Ефективний діаметр діафрагми пульсатора:

$$D_{\text{еф.}} = (1,5 \dots 5) d_{\text{вн.}}, \quad (3.29)$$

де $D_{\text{еф.}}$ – ефективний діаметр діафрагми пульсатора.

Амплітуда переміщення діафрагми пульсатора:

$$A = (0,2 \dots 1,0) d_{\text{вн.}}, A \geq 2 \cdot 10^3 \text{ м}, \quad (3.30)$$

де A – амплітуда переміщень діафрагми пульсатора.

Максимальна частота переміщення діафрагми пульсатора при якій винесення гранул не відбувається:

$$f_{\text{max}} = \frac{0,6 \omega_{\text{ср.}} \cdot d_{\text{вн.}}^2}{A \cdot D_{\text{еф.}}^2}, \quad (3.31)$$

де f_{max} – максимальна частота переміщення діафрагми пульсатора.

Необхідна частота переміщення діафрагми пульсатора:

$$f_{\text{T}} = \frac{L d_{\text{вн.}}^2}{k D_{\text{еф.}}^2 A \tau_{\text{пр.}}}, \quad (3.32)$$

$$k = 0,72, \quad (3.33)$$

де f_{T} – Необхідна частота переміщення діафрагми пульсатора.

Якщо $f_T \leq f_{max}$, то залишаємо раніше прийняті параметри пульсатора, в іншому випадку необхідно змінити $D_{ef.}$ або A .

Час переміщення діафрагми у зворотному напрямку:

$$\tau_0 = \frac{A D_{ef.}^2}{(1,5 \dots 2,0) \omega_{cp.} d_{вн.}^2}, \quad (3.34)$$

де τ_0 – час переміщення діафрагми пульсатора в зворотному напрямку.

Час переміщення діафрагми в прямому напрямку:

$$\tau_n = \tau - \tau_0, \quad (3.35)$$

де τ_n – час переміщення діафрагми в прямому напрямку; τ – часо одного циклу.

$$\tau = \frac{1}{f_T}. \quad (3.36)$$

3.5 Висновки до розділу 3

Напрацьовані дослідні партії гель-сфер носія каталізатора Al_2O_3 діаметром 1,0 – 3,0 мм, та визначені їх міцність і насипна густина після сушки та прокалювання в залежності від режиму роботи обертового віброгранулятора, а саме від частоти обертання корзини та частоти коливань, та від концентрації азотної кислоти і вдношення порошок : кислота ($Al(OH)_3:HNO_3$).

Дослідження фізико-механічних властивостей гранул двоокису алюмінію показали, що при зменшенні діаметру отворів диспергатора від 1,4 мм до 1,2 мм та частоти коливань вібратора від 100 Гц до 40 Гц гранулометричний склад отриманих гранул змінюється незначно. При зменшенні частоти коливань до 70 – 80 Гц межі гранулометричного складу становлять 2,0 – 2,2 мм, а потім при подальшому зменшенні частоти коливань до 40 Гц межі дещо збільшуються і

становлять 2,0 – 2,4 мм. Виявлено, що при діаметрі отворів диспергатора 0,85 мм та частоті коливань 100 Гц межі гранулометричного складу отриманих гранул дещо збільшені до 1,2 – 2,0 мм, але при цьому більшість гранул двоокису алюмінію монодисперсні з діаметром 1,6 мм.

Дослідження щодо впливу концентрації азотної кислоти показали, що при відношенні складу «порошок – кислота» як 1,05 – 2,0 досягається максимальна величина міцності отриманої гранули (1,8 кг/гран).

Рекомендації щодо визначення коефіцієнта витрати μ дають розбіжність із результатами проведених експериментів, особливо за малих числах Рейнольдса ($Re < 105$). Для більш точного визначення коефіцієнта μ доцільно користуватися поправочними коефіцієнтами K_α . Значення цих коефіцієнтів для різних d_0/D і d були визначені в ході фізичних експериментів, та представлені на рисунках 10-13.

Дослідженнями встановлено, що здійснення циркуляції перед отворами суттєво позначається на витіканні рідини через отвори, тобто збільшення окружної швидкості вихору при циркуляції зменшує витрату рідини.

В ході поведення фізичних моделювань процесів, що протікають у змійовиковому пульсаційному промивачі була визначена залежність швидкості руху гель-сфер від частоти переміщення діафрагми пульсатора, амплітуди переміщення діафрагми пульсатора, середнього діаметра змійовика та ступеня заповнення змійовика гранулами.

У ході досліджень були виявлені різні гідродинамічні режими, при яких працює промивач, в залежності від частоти переміщення діафрагм пульсатора: режим переміщення гранул і режим інтенсивного перемішування. Режим інтенсивного перемішування можна рекомендувати для частинок, схильних до злипання. Збільшення середньої швидкості переміщення гель-сфер у змійовику промивача спостерігається до частоти переміщення діафрагми пульсатора до 2,5 – 2,8 Гц. Зі збільшенням амплітуди переміщень діафрагми пульсатора швидкість переміщення частинок лінійно зростає, тому амплітуда має бути деякою мінімальною величиною, яка залежить від розмірів пульсатора.

Показано, що зміна швидкості переміщення частинок у змійовику при зміні середнього діаметра змійовика незначна, тому при розрахунках вплив середнього діаметра на швидкість можна не враховувати.

Встановлено, що при ступеню заповнення робочого простору змійовика гранулами ($K_z > 0.4$) спостерігається відставання нижніх шарів частинок від верхніх. Тому рекомендується проводити процес промивання при ступенях заповнення $K_z < 0,4$.

Запропонована інженерна методика розрахунку змійовикового пульсаційного промивачу, що дозволяє визначити оптимальні параметри його роботи, і як наслідок підвищити інтенсивність промивання гель-сфер.

ВИСНОВКИ

Наведена методика проведення фізичних експериментів процесу дисергування рідини (золю), яка дозволить оцінити вплив гідродинамічних показників та конструктивних параметрів обладнання на фізико-механічні властивості отримуваних гранул каталізатора Al_2O_3 .

Для проведення експериментальних досліджень розроблена установка для отримання каталізаор uAl_2O_3 , та запропонована конструкція пульсаційного змійовикового промивача гель-сфер.

Розроблено диспергуючий пристрій з магнітострикційним вібратором, що дозволить отримувати монодисперсні краплини при швидкості витікання рідини до 7,5 м/с при частоті коливань 15 кГц та 22 кГц. Даний пристрій дозволяє підвищити продуктивність диспергуючого пристрою та надійність його роботи.

Розроблена модель, яка показує, що градієнт швидкості впливає на збільшення внутрішньої циркуляції рідкої краплі, що підтверджує взаємозв'язок між циркуляційними потоками в дисперсній краплині і інтенсифікацією масообмінних процесів. Отримані результати дозволяють вибрати найбільш раціональну організацію руху газо-рідинних потоків в масообмінному апараті та сформулювати основи підвищення ефективності і продуктивності масообмінних процесів та грануляційного обладнання.

У результаті теоретичного аналізу процесу осадження частинок був встановлений вплив сили Басе на швидкість осадження частинок, а саме показано, що врахування сили басе збільшує час осадження на 43%.

Запропонована математична модель для визначення зміни витрати рідини через отвір, що враховує нахил отвору та попередню циркуляцію рідини при витіканні стисненого струменя через отвір. Дана математична модель дозволяє визначити товщину пограничного шару, циркуляцію та витрату рідини через отвір та враховує швидкість руху рідини в отворі та момент прикладений з історони стінок стакану до рідини.

Напрацьовані дослідні партії гель-сфер носія каталізатора Al_2O_3 діаметром 1,0 – 3,0 мм, та визначені їх міцність і насипна густина після сушки та прокалювання в залеженості від режиму роботи обертового віброгранулятора, а саме від частоти обертання корзини та частоти коливань, та від концентрації азотної кислоти і відношення порошок : кислота ($\text{Al}(\text{OH})_3:\text{HNO}_3$).

Виявлено, що при діаметрі отворів диспергатора 0,85 мм та частоті коливань 100 Гц межі гранулометричного складу отриманих гранул дещо збільшені до 1,2 – 2,0 мм, але при цьому більшість гранул двоокису алюмінію монодисперсні з діаметром 1,6 мм. Дослідження щодо впливу концентрації азотної кислоти показали, що при відношенні складу «порошок – кислота» як 1,05 – 2,0 досягається максимальна величина міцності отриманої гранули (1,8 кг/гран).

Дослідженнями встановлено, що здійснення циркуляції перед отворами суттєво позначається на витіканні рідини через отвори, тобто збільшення окружної швидкості вихору при циркуляції зменшує витрати рідини.

В ході поведення фізичних моделювань процесів, що протікають у змійовиковому пульсаційному промивачі була визначена залежність швидкості руху гель-сфер від частоти переміщення діафрагми пульсатора, амплітуди переміщення діафрагми пульсатора, середнього діаметра змійовика та ступеня заповнення змійовика гранулами.

Запропонована інженерна методика розрахунку змійовикового пульсаційного промивачу, що дозволяє визначити оптимальні параметри його роботи, і як наслідок підвищити інтенсивність промивання гель-сфер.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. В.І. Склабінський, М.С. Скиданенко, О.О. Ляпощенко, І.В. Павленко, М.П. Юхименко, М.П. Кононенко, В.М. Покотило, Р.О. Острога, М.М. Дем'яненко, В.А. Шматенко, К.В. Нічволодін, А.Р. Наталуха, В.В. Яковчук, О.М. Хухрянський, Звіт про науково-дослідну роботу “Створення нових гранульованих матеріалів для ядерного палива та каталізаторів в активному гідродинамічному середовищі”, СумДУ, 2020.

2. Demianenko M., Volf M., Skydanenko M., Yakovchuk V., Pavlenko I., Liaposhchenko O. (2020). Numerical Simulation of the Perforated Shell's Oscillations in a Vibrational Priller. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 7(2), pp. F30-F36.

3. Skydanenko, M., Sklabinskyi, V., Kononenko, M., Židek, K., J., Ochowiak, M., Yesypchuk, S., Yakovchuk, V., Pavlenko, I. (2020). Improvement of technology for granulation of carbon-containing mixtures. *Principia Cybernetica 2020*: 43. *Stretnutie Ústavov a Katedier Automatizácie, Kybernetiky a Informatiky Technických Vysokých Škôl a Univerzít z Českej a Slovenskej Republiky (Presov, 02-04.09.2020)*, pp. 15-1–15-6.

4. Skydanenko, M., Sklabinskyi, V., Nadhem, A.-K. M., & Nichvolodin, K. (2021). Determination of granule (prill) movement modes in the prilling tower for mineral fertilizer production. *Technology Audit and Production Reserves*, 5(3(61), 6–9.

5. Muzylyov D., Shramenko N. Ivanov V. Management Decision-Making for Logistics Systems Using a Fuzzy-Neural Simulation / *Advances in Industrial Internet of Things, Engineering and Management // EAI/Springer Innovations in Communication and Computing (EAISICC)*, pp 175-192.

6. Demianenko M., Starynskyi O., Vashyst B., Pavlenko I., Liaposhchenko O., Ivanov V. (2021) Improvement of Hydraulic Characteristics for Impellers Using the Finite Volume Analysis. In: Cagaňová D., Hornáková N., Pusca A., Cunha P.F. (eds) *Advances in Industrial Internet of Things, Engineering and Management. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing*. Springer, Cham, pp. 161-174.

7. Дем'яненко, М. М. Гідродинаміка та гідроаеропружність динамічних сепараційних пристроїв : дис. ... д-ра філософії : 133. Суми, 2021. 214 с.

8. V. Ivanov et al., “Classification of Separation Equipment by Design and Technological Features,” EAI Endorsed Transactions on Energy Web, p. 170676, Aug. 2021. (Scopus, Conference paper)

9. Liaposhchenko, O., Moiseev V., Manoilo E., Demianenko M., Khukhryanskiy O. (2021) Hydrodynamic Parameters of a Combined Contact Device. In: Ivanov V., Pavlenko I., Liaposhchenko O., Machado J., Edl M. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer. Cham, pp. 257-267. (Scopus, Conference paper)

10. O. Liaposhchenko, V. Moiseev, O. Starynskyi, E. Manoilo, and H. Seif, “Equipment for Oilfield Wastewater Treatment Using Swirling Flows,” in Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV, Cham, 2021, pp. 237–246.

11. Ляпощенко О. О., Павленко І. В., Скиданенко М. С., Дем'яненко М. М., Юхименко М. П., Острога Р. О., Яхненко С. М., Кононенко М. П. Вплив технологічних параметрів процесу на характеристики продукту, отриманого за золь-гельною технологією // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали та програма VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 20–23 квітня 2021 р.) / редкол. : О. Г. Гусак, І. В. Павленко. – Суми : Сумський державний університет, 2021. – 291 с. - С. 218.

12. Єсипчук С.С., Наталуха А.Р., Старинський О.Є. Ляпощенко О.О. Моделювання гідродинаміки відцентрово-вихрових пристроїв для масообмінного та сепараційного обладнання // Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 20–23 квітня 2021 р.) / редкол.: О. Г. Гусак, І. В. Павленко. Суми: Сумський державний університет, 2021. С. 213.

13. Яковчук В. В., Дем'яненко М. М., Скиданенко М. С., Павленко І. В., Ляпощенко О. О. Чисельне дослідження вільних коливань перфорованої оболонки віброгранулятора // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали та програма VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м.

Суми, 20–23 квітня 2021 р.) / редкол.: О. Г. Гусак, І. В. Павленко. – Суми : Сумський державний університет, 2021. - С. 113.

14. Сімейко К.В., Маліновській А.І., Карсім С.О., Сидоренко М.А., Кустовська А.Д., Ляпощенко О.О., Купріяничук С.В. Дослідження процесу одержання піровуглецю в електротермічному псевдозрідженому шарі. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2021. №3. С.32-43.

15. Пат. 146598 У Україна, МПК С23С16/26. Спосіб одержання піровуглецю / К.В. Сімейко, В.О. Бородуля, С.Ю. Саєнко, К.В. Лобач, О.П. Кожан, В.М. Дмитрієв М.А. Сидоренко, Я.О. Івачкін, О.В. Марасін, С.С. Кустовський, Р.Є. Чумак; заявник і патентовласник: Інститут газу НАН України. № u 202006806; заявл. 22.10.2020; опубл. 04.03.2021, Бюл. № 9/202 4 с.

16. Пат. 146599 У Україна, МПК С23С16/26. Спосіб одержання пірографіту / К.В. Сімейко, В.О. Бородуля, С.Ю. Саєнко, К.В. Лобач, О.П. Кожан, В.М. Дмитрієв, М.А. Сидоренко, Я.О. Івачкін, О.В. Марасін, І.О. Писаренко, В.С. Рябчук; заявник і патентовласник: Інститут газу НАН України. – № u202006807; заявл. 22.10.2020; опубл. 03.03.2021. Бюл. № 9/2021. – 5 с.

17. Пат. 146619 У Україна, МПК С04В35/536, F16C33/16, F16J15/16. Спосіб виготовлення ущільнюючих елементів з терморозширеного графіту / Б.І. Бондаренко, К.В. Сімейко, О.П. Кожан, В.М. Дмитрієв, М.А. Сидоренко, М.М. Гудков; заявник і патентовласник: Інститут газу НАН України. № u202007207; заявл. 11.11.2020; опубл. 04.03.2021, Бюл. № 9/2021. 4 с.

18. Chernysh Y, Balintova M, Shtepa V, Skvortsova P, Skydanenko M, Fukui M. Integration of Processes of Radionuclide-Contaminated Territories Decontamination in the Framework of Their Ecological-Socio-Economic Rehabilitation. Ecological Engineering & Environmental Technology. 2022;23(1):110-124.

19. Chernysh Ye., Plyatsuk L., Shtepa V., Skydanenko M., Kononenko M., Tsutsumiuchi Kaname. Innovative technologies for increasing environmental safety of atomic energy complex / Sixth International Conference on Nuclear

Decommissioning and Environment Recovery INUDECO 21 (April 27-29, 2021, Slavutych), Chernihiv Polytechnic National University, 2021. – P. 291-294.

20. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г., Гидравлика и аэродинамика, Москва: Стройиздат, 1965.

21. Богомолов А.И., Михайлов К.А., Гидравлика, Москва: Стройиздат; Издание 2-е, перераб. и доп., 648 с., 1972.

22. Яблонский В.С., Краткий курс технической гидромеханики, Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 356 с., 1961.

23. Холин Б.Г., Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылители жидкости. Москва, “Машиностроение”, 1997.

24. Гершал Д.А., Фридман В.М., Ультразвуковая аппаратура. Москва, “Энергия”, 1967.

25. Pavlenko, I.; Zajac, J.; Kharchenko, N.; Duplák, J.; Ivanov, V.; Kostyk, K. Estimation of Wear Resistance for Multilayer Coatings Obtained by Nitrogenchroming. *Metals* 2021, 11, 1153.

26. Demianenko M., Volf M., Pavlenko I., Liaposhchenko O. (2021). Experimental studies on oscillation modes of vibration separation devices. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 8(1), pp. D1–D9.

27. Павленко, І.В. Науково-теоретичні основи вібраційних процесів у гетерогенних системах [Текст]: дисертація ... д-ра техн. наук, спец.: 05.17.08 - процеси та обладнання хімічної технології / І.В. Павленко; наук. консультант В.І. Склабінський. - Суми: СумДУ, 2020. - 476 с.

28. Sklabinskij, V.I., Kholin, B.G., 1992. Intesification of internal currents in drop moving in gas flow with cross velocity gradient. *Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii*, 26(5), pp. 741-745.

29. Honor, A.L., Rivkind, R.Ya., 1982. The dynamics of droplets at low Reynolds numbers. *Results of Science and Technology. Fluid and Gas Mechanics*, 17, pp. 86–159.

30. Plyatsuk, L.D., Ablicieva, I.Yu., Vaskin, R.A., Yeskendirov, M., Hurets, L.L., 2018. Mathematical modeling of gas-cleaning equipment with a highly developed phase contact surface. *Journal of Engineering Sciences*, 5(2), pp. F19-F24.
31. Sklabinsky, V., Liaposhchenko, O., Logvyn, A., Al-Rammahi, M., 2014. Hydrodynamics modeling of gas separator inertial and filter elements for natural gas fine cleaning. *Chemistry and Chemical Technology*, 8(4), pp. 479-485.
32. Kharkov, V., Ovchinnikov, A., 2015. Analysis of forces determining droplet motion in a swirled gas flow. *Bulletin of the Kazan National Research Technological University*, 18(9), pp. 106-109.
33. Yang, Y., Wang, Y., Song, B., Fan, J., Cao, Y., 2018. Stability and accuracy of numerical investigation of droplet motion under local ventilation airflow. *Building and Environment*, 140, pp. 32-42.
34. Ghorbanian, J., Beskok, A., 2016. Scale effects in nano-channel liquid flows. *Microfluidics and Nanofluidics*, 20(8), 121.
35. Guan, Y., Li, B., Zhu, M., Cheng, S., Tu, J., 2019. Deformation, speed, and stability of droplet motion in closed electrowetting-based digital microfluidics. *Physics of Fluids*, 31(6), 062002.
36. O'Hern, T.J., Torczynski, J.R., Clausen, J.R., 2016. Multiphase effects in dynamic systems under vibration. *Fluids Engineering Division*, 1B-2016, 128284.
37. Fukui, T., Kawaguchi, M., Morinishi, K., 2018. A two-way coupling scheme to model the effects of particle rotation on the rheological properties of a semidilute suspension. *Computers and Fluids*, 173, pp. 6-16.
38. Fesenko, A., Yevsiukova, F., Basova, Y., Ivanova, M., Ivanov, V., 2018. Prospects of using hydrodynamic cavitation for enhancement of efficiency of fluid working medium preparation technologies. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 62(4), pp. 269-276.
39. Warnica, W.D., Renksizbulut, M., Strong, A.B., 1995. Drag coefficients of spherical liquid droplets Part 2: Turbulent gaseous fields. *Experiments in Fluids*, 18, pp. 265-276.

40. Biyanto, T.R., Kusuma, F., Musyafa, A., Noriyati, R.D., Bayuaji, R., da Costa, S., Irawan, S., 2016. Correction factor determination on failure rate equation of MacLaurin series for low and high mode application. *Ain Shams Engineering Journal*, 7(2), pp. 827-834.
41. Zhang, X., Wang, E., Ma, L., Shu, C., Zheng, L., 2021. Analysis of hemodynamics and heat transfer of nanoparticle-injected atherosclerotic patient: Considering the drag force and slip between phases of different particle shapes and volume fractions. *International Journal of Thermal Sciences*, 159, 106637.
42. Kholin, B.G., Kovalev, I.A., Sklabinskiy, V.I., 1981. Study of vortex gas flows. *Chemical Technology*, 4, pp. 42-45.
43. Rehman, K.U., 2020. Object dependent optimization of hydrodynamic forces in liquid stream: Finite element analysis. *Journal of Molecular Liquids*, 298, 111953.
44. Pylypaka, S., Klendii, M., Kremets, T., Klendii, O., 2018. Particle motion over the surface of a cylinder, which performs translational oscillations in a vertical plane. *Engineering Journal*, 22(3), pp. 83-92.
45. Combrinck, M.L., Dala, L.N., Lipatov, I.I., 2017. Eulerian derivation of non-inertial Navier–Stokes and boundary layer equations for incompressible flow in constant pure rotation. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 65, pp. 10-30.
46. Harshe, Y.M., Lattuada, M., 2012. Viscosity contribution of an arbitrary shape rigid aggregate to a dilute suspension. *Journal of Colloid and Interface Science*, 367(1), pp. 83-91.
47. Melnikov, G.I., Dudarenko, N.A., Melnikov, V.G., Alyshev, A.S., 2015. Parametric identification of inertial parameters. *Applied Mathematical Sciences*, 9(136), pp. 6757-6765.
48. Shahsavari, M., Oshaghi, M.R., Afshin, H., Firoozabadi, B., 2020. Homotopy perturbation method for unsteady motion of a single bubble in a highly viscous liquid. *Chemical Engineering Communications*.
49. Landel, J.R., Thomas, A.L., McEvoy, H., Dalziel, S.B., 2016. Convective mass transfer from a submerged drop in a thin falling film. *Journal of Fluid Mechanics*, 789, pp. 630-668.

50. Ugon, B., Nandong, J., 2019. Stability region of integrating process based on Routh-Hurwitz stability criteria. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 495(1), 012048.

51. Kim, J., Sim, W., Chung, J., 2021. Modal characteristics and dynamic stability of a whirling rotor with flexible blades. Applied Mathematical Modelling, 89, pp. 1-18.

52. Zhan, X., Dyachenko, A., 2021. On generalization of classical Hurwitz stability criteria for matrix polynomials. Journal of Computational and Applied Mathematics, 383, 113113.

53. Sedletsy, Y.V., 2015. Inclusion of dispersive terms in the averaged Lagrangian method: Turning to the complex amplitude of envelope. Nonlinear Dynamics, 81(1-2), pp. 383-393.

54. Sklabinskiy, V., Kochergin, N., Nahdim, M., 2012. Effect of hydrodynamic gas flow parameters on intensive internal circulating currents in the liquid droplets in the atomizing counterflow mass transfer chamber apparatus. Bulletin of Sumy State University, Series "Technical Sciences", 2, pp. 29-35.

55. Sklabinskyi, V., Pavlenko I. "Intensification of Mass Transfer Processes through the Impact of the Velocity Gradient on Hydrodynamics and Stability of Liquid Droplets in a Gas Flow." Chemical engineering science 235 (2021): 116470-. Web.

56. Liaposhchenko, O., Marenok, V., Skydanenko, M., Pavlenko, I., Ochowiak, M., Mizakova, J., Pitel J., Storozhenko, V., Smyrnov, V., Shmatenko, V. (2021). Modeling of Technological Processes for a Rectification Plant in Second-Generation Bioethanol Production. Processes, Vol. 9(6), 944.

57. Bombardelli, F.A.; González, A.E.; Niño, Y.I. Computation of the particle Basset force with a fractional-derivative approach. J. Hydraul. Eng. 2008, 134, 1513, doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:10(1513).

58. Parmar, M.; Annamalai, S.; Balachandar, S.; Prosperetti, A. Differential formulation of the viscous history force on a particle for efficient and accurate computation. J. Fluid Mech. 2018, 844, 970–993, doi:10.1017/jfm.2018.217.

59. Rossikhin, Y.A.; Shitikova, M.V. Application of fractional calculus for dynamic problems of solid mechanics: Novel trends and recent results. *Appl. Mech. Rev.* 2009, 63, 010801, doi:10.1115/1.4000563.
60. Leal, L.G. Particle motions in a viscous fluid. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1980, 12, 435–476, doi:10.1146/annurev.fl.12.010180.002251.
61. Maxey, M.R.; Riley, J.J. Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow. *Phys. Fluids* 1983, 26, 883–889.
62. Loussaief, H.; Pasol, L.; Feuillebois, F. Motion of a spherical particle in a viscous fluid along a slip wall. *Q. J. Mech. Appl. Math.* 2015, 68, 115–144, doi:10.1093/qjmam/hbv001.
63. Coimbra, C.; Kobayashi, M. On the viscous motion of a small particle in a rotating cylinder. *J. Fluid Mech.* 2002, 469, 257–286, doi:10.1017/S0022112002001829.
64. Oppenheimer, N.; Navardi, S.; Stone, H.A. Motion of a hot particle in viscous fluids. *Phys. Rev. Fluids* 2016, 1, 014001, doi:10.1103/PhysRevFluids.1.014001.
65. Moreno-Casas, P.A.; Bombardelli, F.A. Computation of the Basset force: Recent advances and environmental flow applications. *Environ. Fluid Mech.* 2016, 16, 193–208, doi:10.1007/s10652-015-9424-1.
66. Chung, W.S. Fractional Newton mechanics with conformable fractional derivative. *J. Comput. Appl. Math.* 2015, 290, 150–158, doi:10.1016/j.cam.2015.04.049.
67. Tomovski, Ž.; Sandev, T. Effects of a fractional friction with power-law memory kernel on string vibrations. *Comput. Math. Appl.* 2011, 62, 1554–1561, doi:10.1016/j.camwa.2011.04.042.
68. Rossikhin, Y.A.; Shitikova, M.V. New approach for the analysis of damped vibrations of fractional oscillators. *Shock Vib.* 2009, 16, 387676, doi:10.3233/SAV-2009-0475.
69. Hu, S.; Nadim, A. Three models for rectilinear particle motion with the basset history force. *Electron. J. Differ. Equ.* 2015, 2015, 1–19.

70. Pavlenko, I.; Liaposhchenko, O.; Pitel, J.; Sklabinskyi, V. Parameter identification of the Basset force acting on particles in fluid flow induced by the oscillating wall. *J. Appl. Math. Comput. Mech.* 2019, 18, 53–63, doi:10.17512/jamcm.2019.2.05.

71. Ahmad, B.; Alghanmi, M.; Alsaedi, A. Existence results for a nonlinear coupled system involving both Caputo and Riemann-Liouville generalized fractional derivatives and coupled integral boundary conditions. *Rocky Mt. J. Math.* 2021, 50, 1901–1922, doi:10.1216/RMJ.2020.50.1901.

72. Brzeziński, D.W. Fractional order derivative and integral computation with a small number of discrete input values using Grünwald-Letnikov formula. *Int. J. Comput. Methods* 2020, 17, 1940006, doi:10.1142/S0219876219400061.

73. Qi, F.; Guo, B.-N. From inequalities involving exponential functions and sums to logarithmically complete monotonicity of ratios of gamma functions. *J. Math. Anal. Appl.* 2021, 493, 124478, doi:10.1016/j.jmaa.2020.124478.

74. Azennar, R.; Mentagui, D. On some properties of the conformable fractional derivative. *Moroc. J. Pure Appl. Anal.* 2020, 6, 210–217, doi:10.2478/mjpaa-2020-0016.

75. Liu, L.; Xue, D.; Zhang, S. Closed-loop time response analysis of irrational fractional-order systems with numerical Laplace transform technique. *Appl. Math. Comput.* 2019, 350, 133–152, doi:10.1016/j.amc.2018.11.020.

76. Yüce, A.; Tan, N. Inverse Laplace transforms of the fractional order transfer functions. In *Proceedings of the 2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, Turkey, 28–30 November 2019; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2019; pp. 775–779, doi:10.23919/ELECO47770.2019.8990487.

77. Du, F.; Jia, B. Finite time stability of fractional delay difference systems: A discrete delayed Mittag-Leffler matrix function approach. *Chaos Solitons Fractals* 2020, 141, 110430, doi:10.1016/j.chaos.2020.110430.

78. Jumarie, G. Laplace's transform of fractional order via the Mittag-Leffler function and modified Riemann-Liouville derivative. *Appl. Math. Lett.* 2009, 22, 1659–1664, doi:10.1016/j.aml.2009.05.011.

79. Abbas, S. Proving the extended binomial theorem using ordinary differential equations. *Math. Mag.* 2020, 93, 33–35, doi:10.1080/0025570X.2020.1682451.

80. Tokibetov, J.; Abduakhitova, G.; Assadi, A. Representations of the solutions of the first-order elliptic and hyperbolic systems via harmonic and wave functions respectively. *Complex Var. Elliptic Equ.* 2020, 65, 1565–1574, doi:10.1080/17476933.2019.1669570.

81. Lytvynenko, A.; Yukhymenko, M.; Pavlenko, I.; Pitel, J.; Mizakova, J.; Lytvynenko, O.; Ostroha, R.; Bocko, J. Ensuring the reliability of pneumatic classification process for granular material in a rhomb-shaped apparatus. *Appl. Sci.* 2019, 9, 1604, doi:10.3390/app9081604.

82. Vasylyev, V.V.; Simak, L.O.; Zelenkov, O.A.; Voronova, O.S.; Rybnikova, G.M. *Analysis and Mathematical Modeling of Dynamical Systems Based on Non-Classical Operational Calculus*; National Aviation Institute: Kyiv, Ukraine, 2006.

83. Li, Y.; Sun, N. Numerical solution of fractional differential equations using the generalized block pulse operational matrix. *Comput. Math. Appl.* 2011, 62, 1046–1054, doi:10.1016/j.camwa.2011.03.032.

84. Vasilyev, V.V.; Simak, L.A. *Fractional Calculus and Approximating Approaches in Modeling Dynamic Systems*; National Academy of Sciences of Ukraine: Kyiv, Ukraine, 2008.

85. Khan, A.; Jahanzaib, L.S.; Trikha, P. Fractional inverse matrix projective combination synchronization with application in secure communication. In *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Applications*, Maharaja Surajmal Institute of Technology, New Delhi, India, 6–7 February 2020; Bansal, P., Tushir, M., Balas, V., Srivastava, R., Eds.; *Advances in Intelligent Systems and Computing*; Springer: Singapore, 2021; Volume 1164, pp. 93–101, doi:10.1007/978-981-15-4992-2_10.

86. Wan, Y.; French, R.M. Fractional calculus of hydraulic drag in the free falling process. In *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*; Proulx, T., Ed.; *Experimental and Applied Mechanics*; Springer: New York, NY, USA, 2011; Volume 6, pp. 529–539, doi:10.1007/978-1-4419-9792-0_78.

87. Visitskii, Ye.V.; Petrov, A.G.; Shunderyuk, M.M. The motion of a particle in a viscous fluid under gravity, vibration and Basset's force. *J. Appl. Math. Mech.* 2009, 73, 548–557, doi:10.1016/j.jappmathmech.2009.11.007.

88. Saadatmandia, A.; Dehghanb, M. A new operational matrix for solving fractional-order differential equations. *Comput. Math. Appl.* 2010, 59, 1326–1336, doi:10.1016/j.camwa.2009.07.006.

89. Pavlenko, I.; Ochowiak, M.; Agarwal, P.; Olszewski, R.; Michałek, B.; Krupińska, A. Improvement of Mathematical Model for Sedimentation Process. *Energies* 2021, 14, 4561.

ДОДАТКИ

Таблиця 1 – Результати експериментів

	<i>H</i>	<i>Г</i>	<i>Q</i>
	<i>м</i>	<i>м²/с</i>	<i>л/с</i>
1	2	3	4
0,0635	26	0 0,25	0,009 0,004
	58	0 0,135	0,013 0,00525
	90	0 0,107	0,0162 0,0058
	120	0	0,0187
	120	0,165	0,012
0,133	28	0 0,379	0,23 0,008
	55	0 0,313	0,032 0,0098
	66	0 0,3	0,035 0,012
	96	0 0,5	0,0425 0,0197
	120	0 0,536	0,0475 0,0263
0,167	40	0 0,244	0,0428 0,00665
	53	0 0,348	0,0495 0,0109
	75	0 0,272	0,059 0,0161
	94	0 0,605	0,0655 0,0232
	112	0 0,605	0,072 0,0278
0,2	43	0 0,755	0,064 0,0133
	54	0 0,78	0,073 0,0173
	62	0 0,86	0,074 0,0218
	85	0 0,775	0,09 0,027

117	0	0,106
	0,77	0,037

Сертифікати, що підтверджують участь у міжнародних конференціях

WORLDWIDE CONGRESS of Mineral Fertilizers & Pesticides Producers

16 December, 2021

DIPLOMA

Participation in the Seventh technical online session
of the discussion club SCIF

EXPERIENCE OF ACCOMPLISHING INVESTMENT
PROJECTS IN THE PRODUCTION OF FERTILIZERS

OLEKSANDR LIAPOSHCHENKO

Sumy State University



President
SCIF Congress



Leonid Khalimon

WORLDWIDE CONGRESS of Mineral Fertilizers & Pesticides Producers

16 December, 2021

DIPLOMA

Participation in the Seventh technical online session
of the discussion club SCIF

EXPERIENCE OF ACCOMPLISHING INVESTMENT
PROJECTS IN THE PRODUCTION OF FERTILIZERS

MAKSYM SKYDANENKO

Sumy State University



President
SCIF Congress



Leonid Khalimon

**Акти та звіти про виконання індивідуальних та
загальноуніверситетських грантів**



CS TECHNOLOGY

ADDRESS: UNIT NO. 103, APEX
COMMERCIAL COMPLEX, OPP. TULIP
HOTEL, NH 8, VASAI (EAST), PALGHAR
400208. INDIA


Dr. Vasyl Karpusha,
Rector of Sumy State University,
2, Rymського-Korsakova St.,
40007 Sumy, Ukraine

Invitation Letter

Having thoroughly studied the international market of scientific services for the design and manufacturing of prilling equipment, our company has expressed deep interest in cooperation with Sumy State University.

Since your university has a dealer agreement with the company "CS TECHNOLOGY", we officially addresses you with a proposal to conclude a contract for development of the production line for the manufacture of vibroprillers IN INDIA.

For C. S. TECHNOLOGY


Dr. Mohammed Saleem
C.E.O.

February 5, 2021

Шаблон за версією 01
Затверджено наказом
Ректора СумДУ
№0366-І від 24.04.2020 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник УМС

“28” 11 2021 р.

**ЗВІТ
ПРО РЕЗУЛЬТАТИ УЧАСТІ У ПРОГРАМІ АКАДЕМІЧНОЇ МОБІЛЬНОСТІ
ЗА КОРДОНОМ НАУКОВИХ, НАУКОВО-ПЕДАГОГІЧНИХ ТА ІНШИХ
ПРАЦІВНИКІВ**

Павленко Іван Володимирович
Прізвище, ім'я, по-батькові
професор кафедри КМ ім. В. Марцинковського
Посада, назва структурного підрозділу
Університет Дуйсбург-Ессен, м. Дуйсбург, Німеччина
Приймаюча організація, місто, країна

Термін участі у програмі академічної мобільності: з / 16 / 11 / 2021 р. по / 21 / 11 / 2021 р.

1. Мета програми академічної мобільності: участь у короткотерміновому науковому стажуванні «Advanced Technologies in Industrial Engineering, Additive Manufacturing, Power Machinery, and Robotics» у рамках проєкту DAAD «BE-ING: BEGIN DER ERFOLGREICHEN INTERNATIONALEN NACHHALTIGER GEMEINSAMEN AUSBIL (ID 57537752)» в Університеті Дуйсбург-Ессен, м. Дуйсбург, Німеччина.

2. Що виконано та не виконано у відповідності до програми: мета програми виконана в повному обсязі, зокрема презентовано можливості факультету TeCET щодо участі у програмах міжнародної академічної мобільності та грантової діяльності; презентовано наукові можливості СумДУ за напрямом «Технічні науки»; взято участь у науковому семінарі Інституту виробничої інженерії, науковому семінарі «Additive Manufacturing», науковому семінарі «Engineering Design»; зроблено доповідь на науковому семінарі «Turbomachinery» (Університет Дуйсбург-Ессен, м. Дуйсбург, Німеччина); зроблено доповідь на науковому семінарі Інституту теорії механізмів, динаміки машин і робототехніки (RWTH Aachen University, м. Аахен, Німеччина).

3. Які зустрічі або переговори було проведено під час участі у програмі академічної мобільності (вказати мету, дату та з ким було проведено зустрічі або переговори, контактні реквізити, яких результатів було досягнуто, інші відомості): 17.11.2021 р. – проф. Арун Нагарайа, завідувач кафедри виробничих технологій; проф. Герд Вітг, завідувач кафедри адитивних виробничих технологій; проф. Дітер Бріллерт, завідувач кафедри турбомашин; 18.11.2021 р. – проф. Рейнхардт Шиферс, завідувач кафедри матеріалознавства; 19.11.2021 р. – 19.11.2021 р. – аспіранти факультету механічної інженерії, Університет Дуйсбург-Ессен, м. Дуйсбург, Німеччина; 20.11.2021 р. – проф. Букхарт Корвез, завідувач кафедри деталей машин, RWTH Aachen University, м. Аахен, Німеччина – обговорення питань, пов'язаних із подальшою реалізацією міжнародних програм академічної мобільності викладачів, аспірантів, студентів, а також розвитку шляхів подальшої наукової співпраці.

4. Які матеріали було передано іноземним громадянам: візитівки, інформаційні матеріали СумДУ та фахового наукового видання «Journal of Engineering Sciences».

5. Які матеріали було отримано від іноземних громадян та де планується їх використовувати: візитівки, інформаційні матеріали від Університету Дуйсбург-Ессен, м. Дуйсбург, Німеччина.

Інформація наведена у цьому звіті є достовірною.

22.11.2021 р.

Дата подання звіту

(Особистий підпис керівника підрозділу
або вищої посадової особи)

(Особистий підпис учасника програми
академічної мобільності)

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Шаблон за версією 01
Затверджено наказом
Ректора СумДУ
№0366-І від 24.04.2020 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник УМС

"23" 11 2021 р.

**ЗВІТ
ПРО РЕЗУЛЬТАТИ УЧАСТІ У ПРОГРАМІ АКАДЕМІЧНОЇ МОБІЛЬНОСТІ
ЗА КОРДОНОМ НАУКОВИХ, НАУКОВО-ПЕДАГОГІЧНИХ ТА ІНШИХ
ПРАЦІВНИКІВ**

Іванов Віталій Олександрович

Прізвище, ім'я, по-батькові

завідувач кафедри ТМВІ

Посада, назва структурного підрозділу

Університет Дуйсбург-Ессен, м. Дуйсбург, Німеччина

Приймаюча організація, місто, країна

Термін участі у програмі академічної мобільності: з / 16 / 11 / 2021 р. по / 21 / 11 / 2021 р.

1. Мета програми академічної мобільності: участь у короткотерміновому науковому стажуванні «Advanced Technologies in Industrial Engineering, Additive Manufacturing, Power Machinery, and Robotics» у рамках проєкту DAAD «BE-ING: BEGIN DER ERFOLGREICHEN INTERNATIONALEN NACHHALTIGER GEMEINSAMEN AUSBIL (ID 57537752)» в Університеті Дуйсбург-Ессен, м. Дуйсбург, Німеччина.

2. Що виконано та не виконано у відповідності до програми: мета програми виконана в повному обсязі, зокрема презентовано можливості факультету TeCET щодо участі у програмах міжнародної академічної мобільності та грантової діяльності; презентовано наукові можливості науково-навчального центру промислового інжинірингу; зроблено доповіді на науковому семінарі Інституту виробничої інженерії, на науковому семінарі «Additive Manufacturing»; взято участь у наукових семінарах «Turbomachinery», «Engineering Design» (Університет Дуйсбург-Ессен, м. Дуйсбург, Німеччина) та у семінарі Інституту теорії механізмів, динаміки машин і робототехніки (RWTH Aachen University, м. Аахен, Німеччина).

3. Які зустрічі або переговори було проведено під час участі у програмі академічної мобільності (вказати мету, дату та з ким було проведено зустрічі або переговори, контактні реквізити, яких результатів було досягнуто, інші відомості): 17.11.2021 р. – проф. Арун Нагарайа, завідувач кафедри виробничих технологій; проф. Герд Вітт, завідувач кафедри адитивних виробничих технологій; проф. Дітер Бріллерт, завідувач кафедри турбомашин; 18.11.2021 р. – проф. Рейнхардт Шиферс, завідувач кафедри матеріалознавства; 19.11.2021 р. – 19.11.2021 р. – аспіранти факультету механічної інженерії, Університет Дуйсбург-Ессен, м. Дуйсбург, Німеччина; 20.11.2021 р. – проф. Букхарт Корвез, завідувач кафедри деталей машин, RWTH Aachen University, м. Аахен, Німеччина – обговорення питань, пов'язаних із подальшою реалізацією міжнародних програм академічної мобільності викладачів, аспірантів, студентів, а також розвитку шляхів подальшої наукової співпраці.

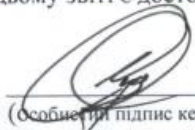
4. Які матеріали було передано іноземним громадянам: візитівки, інформаційні матеріали СумДУ, міжнародної наукової конференції «DSMIE-2022».

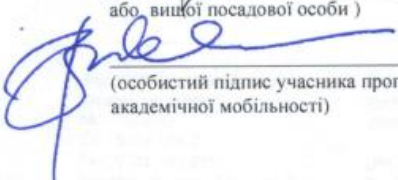
5. Які матеріали було отримано від іноземних громадян та де планується їх використовувати: візитівки, інформаційні матеріали від Університету Дуйсбург-Ессен, м. Дуйсбург, Німеччина.

Інформація наведена у цьому звіті є достовірною.

22.11.2021 р.

Дата подання звіту


(Особистий підпис керівника підрозділу
або вищої посадової особи)


(особистий підпис учасника програми
академічної мобільності)


(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)


(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Шаблон за версією 01
Затверджено наказом
Ректора СумДУ
№0366-І від 24.04.2020 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Начальник

“23” 11 2021 р.

**ЗВІТ
ПРО РЕЗУЛЬТАТИ УЧАСТІ У ПРОГРАМІ АКАДЕМІЧНОЇ МОБІЛЬНОСТІ
ЗА КОРДОНОМ НАУКОВИХ, НАУКОВО-ПЕДАГОГІЧНИХ ТА ІНШИХ
ПРАЦІВНИКІВ**

Ляпощенко Олександр Олександрович

Прізвище, ім'я, по-батькові

професор кафедри ХІ

Посада, назва структурного підрозділу

Університет Дуйсбург-Ессен, м. Дуйсбург, Німеччина

Приймаюча організація, місто, країна

Термін участі у програмі академічної мобільності: з / 16 / 11 / 2021 р. по / 21 / 11 / 2021 р.

1. Мета програми академічної мобільності: участь у короткотерміновому науковому стажуванні «Advanced Technologies in Industrial Engineering, Additive Manufacturing, Power Machinery, and Robotics» у рамках проєкту DAAD «BE-ING: BEGIN DER ERFOLGREICHEN INTERNATIONALEN NACHHALTIGER GEMEINSAMEN AUSBIL (ID 57537752)» в Університеті Дуйсбург-Ессен, м. Дуйсбург, Німеччина.

2. Що виконано та не виконано у відповідності до програми: мета програми виконана в повному обсязі, зокрема презентовано можливості факультету ТеСЕТ щодо участі у програмах міжнародної академічної мобільності та грантової діяльності; презентовано наукові можливості СумДУ за напрямом «Технічні науки»; взято участь у науковому семінарі Інституту теорії механізмів, динаміки машин і робототехніки (RWTH Aachen University, м. Аахен, Німеччина), науковому семінарі «Additive Manufacturing», науковому семінарі «Turbomachinery»; зроблено доповіді на науковому семінарі Інституту виробничої інженерії та науковому семінарі «Engineering Design» (Університет Дуйсбург-Ессен, м. Дуйсбург, Німеччина).

3. Які зустрічі або переговори було проведено під час участі у програмі академічної мобільності (вказати мету, дату та з ким було проведено зустрічі або переговори, контактні реквізити, яких результатів було досягнуто, інші відомості): 17.11.2021 р. – проф. Арун Нагарайа, завідувач кафедри виробничих технологій; проф. Герд Вітт, завідувач кафедри адитивних виробничих технологій; проф. Дітер Бріллерт, завідувач кафедри турбомашин; 18.11.2021 р. – проф. Рейнхардт Шиферс, завідувач кафедри матеріалознавства; 19.11.2021 р. – 19.11.2021 р. – аспіранти факультету механічної інженерії, Університет Дуйсбург-Ессен, м. Дуйсбург, Німеччина; 20.11.2021 р. – проф. Буххарт Корвез, завідувач кафедри деталей машин, RWTH Aachen University, м. Аахен, Німеччина – обговорення питань, пов'язаних із подальшою реалізацією міжнародних програм академічної мобільності викладачів, аспірантів, студентів, а також розвитку шляхів подальшої наукової співпраці, в тому числі з трансферу технологій (наукових розробок / інжинірингових послуг для хімічної, нафтогазопереробної, металургійної, атомної, харчової та інших галузей промисловості).

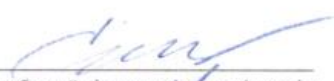
4. Які матеріали було передано іноземним громадянам: візитівки, інформаційно-рекламні матеріали СумДУ з наукових розробок сепараційного, тепло- та масообмінного обладнання, а також послуг комплексного інжинірингу технологічних ліній та комплексів для хімічної, нафтогазопереробної, металургійної, атомної, харчової та інших галузей промисловості.

5. Які матеріали було отримано від іноземних громадян та де планується їх використовувати: візитівки, інформаційні матеріали від Університету Дуйсбург-Ессен, м. Дуйсбург, Німеччина.

Інформація наведена у цьому звіті є достовірною.


22.11.2021 р.

Дата подання звіту


(Особистий підпис керівника підрозділу
або вищої посадової особи)

Всеволод СКЛАБІНСЬКИЙ

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)


(особистий підпис учасника програми
академічної мобільності)

Олександр ЛЯПОЩЕНКО

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)



Universität Duisburg-Essen • 47057 Duisburg •
Produktentstehungsprozesse und Datenmanagement

Prof. Oleksandr Liaposhchenko, DSc.
Professor of the Department of
Chemical Engineering
Sumy State University
2, Rymyskogo-Korsakova St.
Sumy, 40007, Ukraine

Fakultät für Ingenieur-
wissenschaften

Institut für Produkt Engineering

Prof. Dr.-Ing. Arun Nagarajah
Tel.: 0203 379-2585
Fax: 0203 379-4379
arun.nagarajah@uni-due.de
Lotharstraße 1
47057 Duisburg
MA 224

20.11.2021

Confirmation Letter

Dear Prof. Oleksandr Liaposhchenko,

It is my pleasure to confirm that you have successfully completed the short-term scientific internship "Advanced Technologies in Industrial Engineering, Additive Manufacturing, Power Machinery, and Robotics" during November 16-20, 2021, at University of Duisburg-Essen (Duisburg, Germany), within the implementation of the project ""BE-ING: BEGINN DER ERFOLGREICHEN INTERNATIONALEN NACHHALTIGEN GEMEINSAMEN AUSBILDUNG (ID 57537752)" funded by DAAD.

Sincerely

A handwritten signature in blue ink that reads "Arun Nagarajah".

Prof. Dr.-Ing. Arun Nagarajah

Universität Duisburg-Essen
Fakultät Ingenieurwissenschaften
IPE / KKM-CAE
Lotharstr. 1
47057 Duisburg

Anschrift Campus Duisburg
Forsthausweg 2
47057 Duisburg
Tel.: 0203 379-0
Fax: 0203 379-3333
Nachbriefkasten: Gebäude LG

Anschrift Campus Essen
Universitätsstraße 2
45141 Essen
Tel.: 0201 183-0
Fax: 0201 183-2151
Nachbriefkasten: Gebäude T02

Bankverbindung
IBAN: DE40 3605 0105 0000 269 803
SWIFT/BIC: SPESDE 3EXXX

USt-IdNr.
DE 811 272 995

www.uni-due.de



Universität Duisburg-Essen • 47057 Duisburg •
Produktentstehungsprozesse und Datenmanagement

Prof. Ivan Pavlenko, DSc.,
Professor of the Department of
Computational Mechanics
named after Volodymyr Martsynkovskyy
Sumy State University
2, Rymkogo-Korsakova St.
Sumy, 40007, Ukraine

Fakultät für Ingenieur-
wissenschaften

Institut für Produkt Engineering

Prof. Dr.-Ing. Arun Nagarajah
Tel.: 0203 379-2585
Fax: 0203 379-4379
arun.nagarajah@uni-due.de
Lotharstraße 1
47057 Duisburg
MA 224

08.11.2021

Invitation Letter

Dear Prof. Ivan Pavlenko,

It is my pleasure to invite you to carry out a short-term scientific internship "Advanced Technologies in Industrial Engineering, Additive Manufacturing, Power Machinery, and Robotics" during November 16-20, 2021, within the implementation of the project "BE-ING: BEGINN DER ERFOLGREICHEN INTERNATIONALEN NACHHALTIGEN GEMEINSAMEN AUSBILDUNG (ID 57537752)" funded by DAAD.

All costs associated with this visit (accommodation, transportation, health insurance, and daily allowance) will be covered by the University of Duisburg-Essen within the project costs. The salary for this internship is not provided.

Sincerely

Prof. Dr.-Ing. Arun Nagarajah

Universität Duisburg-Essen
Fakultät Ingenieurwissenschaften
IPE / KKM-CAE
Lotharstr. 1
47057 Duisburg

Anschrift Campus Duisburg
Forsthausweg 2
47057 Duisburg
Tel.: 0203 379-0
Fax: 0203 379-3333
Nachtbrieffkasten: Gebäude LG

Anschrift Campus Essen
Universitätsstraße 2
45141 Essen
Tel.: 0201 183-0
Fax: 0201 183-2151
Nachtbrieffkasten: Gebäude T02

Bankverbindung
IBAN: DE40 3605 0105 0000 269 803
SWIFT/BIC: SPESDE 3EXXX
USt-IdNr.
DE 811 272 995

www.uni-due.de



Universität Duisburg-Essen • 47057 Duisburg •
Produktentstehungsprozesse und Datenmanagement

Prof. Vitalii Ivanov, DSc.
Head of the Department
of Manufacturing Engineering,
Machines and Tools
Sumy State University
2, Rymkogo-Korsakova St.
Sumy, 40007, Ukraine

Fakultät für Ingenieur-
wissenschaften

Institut für Produkt Engineering

Prof. Dr.-Ing. Arun Nagarajah
Tel.: 0203 379-2585
Fax: 0203 379-4379
arun.nagarajah@uni-due.de
Lotharstraße 1
47057 Duisburg
MA 224

08.11.2021

Invitation Letter

Dear Prof. Vitalii Ivanov,

It is my pleasure to invite you to carry out a short-term scientific internship "Advanced Technologies in Industrial Engineering, Additive Manufacturing, Power Machinery, and Robotics" during November 16-20, 2021, within the implementation of the project "BE-ING: BEGINN DER ERFOLGREICHEN INTERNATIONALEN NACHHALTIGEN GEMEINSAMEN AUSBILDUNG (ID 57537752)" funded by DAAD.

All costs associated with this visit (accommodation, transportation, health insurance, and daily allowance) will be covered by the University of Duisburg-Essen within the project costs. The salary for this internship is not provided.

Sincerely

Prof. Dr.-Ing. Arun Nagarajah

Universität Duisburg-Essen
Fakultät Ingenieurwissenschaften
IPE / KKM-CAE
Lotharstr. 1
47057 Duisburg

Anschrift Campus Duisburg
Forsthausweg 2
47057 Duisburg
Tel.: 0203 379-0
Fax: 0203 379-3333
Nachbriefkasten: Gebäude LG

Anschrift Campus Essen
Universitätsstraße 2
45141 Essen
Tel.: 0201 183-0
Fax: 0201 183-2151
Nachbriefkasten: Gebäude T02

Bankverbindung
IBAN: DE40 3605 0105 0000 269 803
SWIFT/BIC: SPESDE 3EXXX

USt-IdNr.
DE 811 272 995

www.uni-due.de

Mr. Oleh Khukhrianskyi
Sumy State University
Faculty of Technical Systems and
Energy Efficient Technologies
2 Rymського-Korsakova St.
Sumy, 40007, Ukraine

Váš list/zo dňa

Naše číslo

Vybavuje/linka
Knapčíková

Prešov
05.05.2021

SUBJECT: Confirmation Letter

It is our pleasure to confirm that Mr. Oleh Khukhrianskyi has successfully completed a research internship on the topic "Hydrodynamic and heat and mass transfer characteristics of modular combined disk-packed contact sections" at the Faculty of Manufacturing Technologies of Technical University of Košice.

From November 2, 2020 to February 5, 2021 the following research tasks were completed:

- studies of the hydraulic characteristics of the modular combined tray-packed contact section of the column;
- theoretical studies of the processes of mass transfer in the gas (steam) system;
- development of physical and mathematical models of processes.

Best regards,




Assoc.Prof. Eng. MSc. Lucia Knapčíková, Ph.D.
Vice-Dean for International Relations and Mobility

Mr. Oleh Khukhrianskyi
Sumy State University
Faculty of Technical Systems and
Energy Efficient Technologies
2 Rymaskogo-Korsakova St.
Sumy, 40007, Ukraine

Váš list/zo dňa

Naše číslo

Vybavuje/linka
Knapčíková

Prešov
05.05.2021

SUBJECT: Confirmation Letter

It is our pleasure to confirm that Mr. Oleh Khukhrianskyi has successfully completed a research internship on the topic "Hydrodynamic and heat and mass transfer characteristics of modular combined disk-packed contact sections" at the Faculty of Manufacturing Technologies of Technical University of Košice.

From November 2, 2020 to February 5, 2021 the following research tasks were completed:

- studies of the hydraulic characteristics of the modular combined tray-packed contact section of the column;
- theoretical studies of the processes of mass transfer in the gas (steam) system;
- development of physical and mathematical models of processes.

Best regards,




Assoc.Prof. Eng. MSc. Lucia Knapčíková, Ph.D.
Vice-Dean for International Relations and Mobility

Протоколи та договори про співпрацю зі сторонніми організаціями в рамках науково-дослідної роботи

ІІІ МІЖНАРОДНИЙ КРУГЛИЙ СТИЛ

ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙ У АТОМНУ ЕНЕРГЕТИКУ

РЕЄСТРАЦІЯ
ДО 14 ВЕРЕСНЯ



РЕЄСТРАЦІЯ
ДО 14 ВЕРЕСНЯ

ІІІ МІЖНАРОДНИЙ КРУГЛИЙ СТИЛ

ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙ У АТОМНУ ЕНЕРГЕТИКУ

РЕЄСТРАЦІЯ
ДО 14 ВЕРЕСНЯ



РЕЄСТРАЦІЯ
ДО 14 ВЕРЕСНЯ

ІНФОРМАЦІЙНЕ ПОВІДОМЛЕННЯ	ЗАРЕЄСТРОВАНІ ДОПОВІДІ
<p>ГЕНЕРАЛЬНИЙ ПАРТНЕР: ДП «НАЕК «ЕНЕРГОАТОМ»</p> <p>СПИВОРГАНІЗАТОР:</p> <p>РАДА МОЛОДИХ ВЧЕННИХ ІНСТИТУТУ ГАЗУ НАН УКРАЇНИ РАДА МОЛОДИХ ВЧЕННИХ ІНСТИТУТУ ПРОБЛЕМ БЕЗПЕКИ АЕС НАН УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР З ЯДЕРНОЇ ТА РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ РАДА МОЛОДИХ ВЧЕННИХ ІНСТИТУТУ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ РАДА МОЛОДИХ ВЧЕННИХ ІНСТИТУТУ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ НАН УКРАЇНИ</p> <p>ІНФОРМАЦІЙНІ ПАРТНЕРИ:</p> <p>ТЕЛЕКАНАЛ «ПРАВДАТУ» «РАДУАЦІУ» ГРОМАДСЬКЕ РАДІО «ГРОМАДСЬКЕ РАДІО» ЛЕКТОРІЙ «SCIENTIFIC MEETINGS» ЖУРНАЛ «ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ТА РЕСУРСОБЕРЕЖЕННЯ» ТЕЛЕГРАМ-КАНАЛ РАДИ МОЛОДИХ ВЧЕННИХ НАН УКРАЇНИ</p> <p>ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ:</p> <p>Голова: Сімецько К.В., д.т.н., заст. голови Ради молодих вчених при Відділенні фізико-технічних проблем енергетики НАН України Члени: ст.с. директор Інституту газу НАН України В.П. Халецький, голова ОМ, ст.с. директор секції Українського ядерного товариства, начальниці зміни блоку ВП «Хмельницька АЕС», ДП «НАЕК «Енергоатом» Виконавчий секретар: Лавренко Д.В., д.т.н., директор з інформаційного супроводу ДП «НАЕК «Енергоатом», вик. секретар Українського ядерного товариства Секретар: Курдинчук С.В., голова Ради молодих вчених та м.к.с. Інституту проблем безпеки АЕС НАН України</p> <p>ЧЛЕНИ КОМІТЕТУ:</p> <p>Носовський А.В., академик НАН України, д.т.н., проф., директор Інституту проблем безпеки АЕС НАН України Жук Г.В., д.т.н., с.н.с., директор Інституту газу НАН України Кравченко В.П., д.т.н., проф., зав. кафедри атомних електростанцій ДУ «Одеська політехніка» Голуб О.В., к.т.н., головний інженер ВП «Науково-технічний центр» ДП «НАЕК «Енергоатом» Черноусенко Ю., д.т.н., проф., зав. кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Смерак М.М., д.т.н., проф., зав. кафедри теплоенергетики, теплових та атомних електростанцій НУ «Львівська політехніка» Глинський О.Г., начальник зміни блоку ВП «Запорізька АЕС», ДП «НАЕК «Енергоатом» Вішнів І.В., д.т.н., с.н.с., заст. директора Інституту електродинаміки НАН України Тетякєв Е.Т., представник Lokis (Літва)</p> <p>Дмитрієва Д.О., начальник сектору навчально-методичного забезпечення відділу організації науково-технічної діяльності Державного науково-технічного центру з ядерної та радіаційної безпеки Лопоченко О.О., д.т.н., проф., заст. декана факультету технічних систем та енергоефективних технологій Сумського державного університету Степаненко А.В., д.т.н., заст. директора Інституту газу НАН України Степаненко Ю.М., к.ф.м.н., ст.с. Інституту ядерних досліджень НАН України Лобач К.В., к.т.н., м.к.с. ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» Малиновський А.І., к.с. Інституту тепло- та масообміну ім. А.В. Ликова НАН Білорусі Жабін С.О., к.іст.н., ст.н.с. ДУ Інститут досліджень науково-технічного потенціалу та історії науки ім. Г.М. Доброва НАН України</p> <p>Білан Т.Р., к.т.н., ст.н.с. Інституту загальної енергетики НАН України Зенко О.Ю., віце-президент Українського комітету Міжнародної ради з великих електроенергетичних систем «СІGRE» Кочуба І.В., к.т.н., заст. директора Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.С. Луценка НАН України Іщенко О.П., к.т.н., провідний інженер з управління реактором ВП «Южно-Українська АЕС», ДП «НАЕК «Енергоатом»</p>	<p>Вибір типу реакторної установки для будівництва нових потужностей АЕС в Україні</p> <p>Створення підмаксимально енергетичної системи на основі АЕС з виробництвом водню та застосуванням акумулюючих батарей</p> <p>Підвищення ефективності нафтовидобутку за рахунок використання лазерних реакторів</p> <p>З досвіду зпровадження інноваційних розробок для планування безпеки АЕС</p> <p>Electricity generation in the world and current status of nuclear-power industry</p> <p>Психологічні аспекти роботи в персоналом для підвищення безпеки та розвитку атомної енергетики</p> <p>Можливості сучасної України в виробничій складовій ТЗВ, а також чотирьох контейнерів їх зберігання після відпрацювання</p> <p>Термографічний контроль комунікацій та споруд бривкальних басейнів АЕС</p> <p>Послідиження ефективності гнучких електричних мереж і керування в процесі електричної комунікації з радіаційно забрудненим вод АЕС, оцінка безпеки реакторів ВЕР</p> <p>Можливості використання навориди при екстремному охолодженні ядерних реакторів</p> <p>Інноваційні пропозиції АТ «Турбоатом» по підвищенню надійності та економічності турбінного обладнання АЕС</p> <p>Cyber Resilience and Cybersecurity for Nuclear Facilities</p> <p>Перспективи промислового виробництва водню/аміаку з використанням атомної енергетики</p> <p>Підвищення рівня екологічної безпеки об'єкта «Укрент» шляхом вилучення і контейнеризації ядерних матеріалів</p> <p>Роль АЕС на ринку допоміжних послуг та безпеці енергосистем України</p> <p>Втірення використання відходів ядерного циклу</p>
<p>Олег Бодур, к.т.н., головний інженер ВП «Науково-технічний центр» ДП «НАЕК «Енергоатом»</p> <p>Микола Волошко, директор ВП «Науково-технічний центр» ДП «НАЕК «Енергоатом»</p> <p>Олександр Куцак, к.т.н., проф., заступник керівника атомних енергетичних підприємств «Об'єднанні підприємств»</p> <p>Олександр Казимир, проф., генеральний директор ТОВ «Науково-виробниче підприємство «АТОМІМПЛЕКС/ПРИАД»</p> <p>Igor Piroo, D.Sc., PhD, prof., foreign fellow of NAS of Ukraine, professor of Ontario Tech University, Canada</p> <p>Igor Dubinin, аспірант спеціалізованого розбігаційного відділення ТМО «Психіатри»</p> <p>Радимир Король, к.т.н., директор Державного зрубного інституту ДП «НДТ»</p> <p>Володимир Пшеничко, д.т.н., директор Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України</p> <p>Євген Іван Білоус, к.т.н., проф., співробітник асистенту голови виконавчого керівництва НАН України»</p> <p>Микола Сторенко, науковий співробітник Інституту газу НАН України</p> <p>Igor Palyach, к.т.н., заступник головного конструктора АТ «Турбоатом»</p> <p>Igor Kolobov, к.т.н., генеральний директор Isolutions, співробітник асистенту голови виконавчого керівництва НАН України</p> <p>Масам Сатіда, директор ТОВ «Арус енайс»</p> <p>Сергій Кудряшкін, молодший науковий співробітник Інституту проблем безпеки АЕС НАН України</p> <p>Владислав Лещко, к.т.н., доцент кафедри електричних станцій та систем Вінницького національного технічного університету</p> <p>Євгеній Тетякєв, представник Lokis (Літва)</p>	<p>Олег Бодур, к.т.н., головний інженер ВП «Науково-технічний центр» ДП «НАЕК «Енергоатом»</p> <p>Микола Волошко, директор ВП «Науково-технічний центр» ДП «НАЕК «Енергоатом»</p> <p>Олександр Куцак, к.т.н., проф., заступник керівника атомних енергетичних підприємств «Об'єднанні підприємств»</p> <p>Олександр Казимир, проф., генеральний директор ТОВ «Науково-виробниче підприємство «АТОМІМПЛЕКС/ПРИАД»</p> <p>Igor Piroo, D.Sc., PhD, prof., foreign fellow of NAS of Ukraine, professor of Ontario Tech University, Canada</p> <p>Igor Dubinin, аспірант спеціалізованого розбігаційного відділення ТМО «Психіатри»</p> <p>Радимир Король, к.т.н., директор Державного зрубного інституту ДП «НДТ»</p> <p>Володимир Пшеничко, д.т.н., директор Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України</p> <p>Євген Іван Білоус, к.т.н., проф., співробітник асистенту голови виконавчого керівництва НАН України»</p> <p>Микола Сторенко, науковий співробітник Інституту газу НАН України</p> <p>Igor Palyach, к.т.н., заступник головного конструктора АТ «Турбоатом»</p> <p>Igor Kolobov, к.т.н., генеральний директор Isolutions, співробітник асистенту голови виконавчого керівництва НАН України</p> <p>Масам Сатіда, директор ТОВ «Арус енайс»</p> <p>Сергій Кудряшкін, молодший науковий співробітник Інституту проблем безпеки АЕС НАН України</p> <p>Владислав Лещко, к.т.н., доцент кафедри електричних станцій та систем Вінницького національного технічного університету</p> <p>Євгеній Тетякєв, представник Lokis (Літва)</p>



ДОГОВІР
про співробітництво
між Сумським державним університетом
та Інститутом газу Національної академії наук України

№ 1103-2021м/0015

« 08 » ЧЕРВНЯ 2021 року

Сумський державний університет, в особі ректора КАРПУШІ Василя Даниловича, який діє на підставі Статуту університету, з однієї сторони, та

Інститут газу Національної академії наук України, в особі виконуючого обов'язки директора ЖУКА Геннадія Віліоровича, який діє на підставі Статуту, з іншої сторони (разом - Сторони), уклали цей Договір з метою налагодження співпраці в галузі освіти та науки.

І. ПРЕДМЕТ ДОГОВОРУ

1.1. Предметом цього Договору є співробітництво на безоплатній основі в сфері ефективного використання наявних ресурсів Сторін за напрямками, передбаченими п. 2.1. Договору.

1.2. Мета Договору - розвиток і поглиблення взаємних зв'язків Сторін в галузі освіти та науки.

1.3. Предметом Договору можуть виступати й інші форми та види співпраці, що не суперечать чинному законодавству України та нормативно- правовим актам, які регламентують діяльність Сторін.

2. НАПРЯМИ ТА ФОРМИ СПІВПРАЦІ

2.1. Співробітництво між Сторонами здійснюється за такими основними напрямками:

2.1.1. Науково-дослідна сфера:

- реалізація науково-дослідних проектів;
- спільне проведення наукових, науково-практичних і науково-методичних конференцій, симпозіумів, конгресів, семінарів та інших наукових заходів;
- взаємна участь в діяльності наукових журналів (часописів) та інших засобів масової інформації, заснованих Сторонами;
- спільна участь у міжнародних науково-освітніх програмах;
- взаємний обмін інформацією про науково-дослідні та освітні проекти, які проводяться в Україні та/або за кордоном.

2.1.2. Навчально-методична сфера:

- підготовка наукових та науково-педагогічних кадрів в аспірантурі та докторантурі (за окремим договором);
- можливість здійснення захисту дисертаційних досліджень на здобуття наукового ступеня кандидата наук (доктора філософії) та доктора наук, підготовлених науково-педагогічними та науковими співробітниками однієї Сторони у спеціалізованих вчених радах іншої Сторони (за окремим договором);
- організація та проведення виробничих і переддипломних практик та сприяння працевлаштуванню випускників СумДУ;
- організація та здійснення взаємних стажувань, навчань, підвищення



кваліфікації науково-педагогічних працівників Сторін;

- сприяння обміну науковими, науково-педагогічними та іншими працівниками для проведення навчальних занять, освоєння новітньої техніки і методики наукових досліджень;

- обмін досвідом, взаємна методична допомога у створенні навчально-методичного забезпечення освітнього процесу;

- розробка та впровадження новітніх методик, інноваційних технологій, педагогічних технологій, навчальних курсів та програм з професійної підготовки відповідних фахівців;

- сприяння участі своїх співробітників як незалежних експертів у роботі екзаменаційних комісій;

- взаємна допомога у рецензуванні навчально-методичної та наукової продукції;

- реалізація проектів щодо спільного видавництва навчальної та науково-методичної продукції: підручників, навчальних посібників тощо для навчально-методичного забезпечення освітнього процесу, в тому числі електронних, які не мають грифу обмеження доступу;

- обмін навчально-методичним матеріалом, бібліографічною та довідковою літературою, які не мають грифу обмеження доступу;

- обмін інформацією про вітчизняні та зарубіжні науково-дослідні і освітні проекти, інші наукові заходи, які перебувають у сфері інтересів Сторін.

2.2. Сторони можуть здійснювати й іншу діяльність, не передбачену цим Договором, однак спрямовану на досягнення його мети.

2.3. Для врегулювання відносин, що виникають з умов договору та для його реалізації Сторони можуть укладати окремі договори та додаткові угоди, в яких визначати конкретні зобов'язання Сторін, у тому числі щодо фінансового, матеріально-технічного забезпечення.

3. ПРАВА ТА ОБОВ'ЯЗКИ СТОРІН

3.1. Сторони мають право:

- виступати ініціаторами організації і здійснення наукових, освітніх та соціально-культурних проектів;

- отримувати інформацію про діяльність кожної зі Сторін, безпосередньо пов'язану з предметом даного Договору.

3.2. Сторони беруть на себе зобов'язання:

- дотримуватися конфіденційності щодо змісту та форм їхньої співпраці;

- інформувати одна одну стосовно організації та проведення спільних заходів: наукових, науково-методичних і науково-практичних конференцій; педагогічних, методичних і методологічних семінарів та інших форм співробітництва, передбачених предметом даного Договору;

- обирати кандидатури для участі у спільних проектах, інформувати їх про умови участі в цих заходах;

- дотримуватися вимог чинного законодавства України у сфері охорони державної таємниці;

- виконувати умови даного Договору.

3.3. Права на об'єкти інтелектуальної власності, які виникнуть в результаті взаємного співробітництва, будуть належати Сторонам відповідно до окремих

договорів.

4. ТЕРМІН ДІЇ, ПОРЯДОК ВНЕСЕННЯ ЗМІН ТА РОЗІРВАННЯ ДОГОВОРУ

4.1. Договір укладено українською мовою в двох примірниках, по одному для кожної зі Сторін. Обидва примірники мають однакову юридичну силу.

4.2. Усі зміни та доповнення до цього Договору вносяться за взаємною згодою Сторін шляхом укладання додаткових угод.

4.3. Договір набирає чинності з дати його підписання та укладається на невизначений строк.

4.4. Договір може бути розірваний за згодою Сторін або за вимогою однієї зі Сторін. У цьому випадку Сторона, яка висловила бажання розірвати договір, попереджає іншу сторону не менш ніж за один місяць.

5. ІНШІ УМОВИ

5.1. Договір не покладає на Сторони грошових зобов'язань і реалізується на основі взаємної співпраці, взаємодопомоги та взаєморозуміння.

5.2. Усі питання регулювання фінансових стосунків Сторін за межами предмета цього Договору вирішуються за домовленістю Сторін відповідно до чинного законодавства України.

6. АДРЕСИ ТА РЕКВІЗИТИ СТОРІН

Сумський державний університет

40007, м. Суми,
вул. Римського-Корсакова 2,
тел.(0542) 33-40-58,
ЄДРПОУ 05408289



Василь КАРПУША
М.П.

Інститут газу

Національної академії наук України

03113, м. Київ,
вул. Дегтярівська, 39,
тел. (044) 456- 44-71,
ЄДРПОУ 05417035



В.о. директора

Геннадій ЖУК
М.П.

06.05.2021 р.

Суми

ПРОТОКОЛ
науково-технічної наради
по темі: «Технології та обладнання для різання і спікання матеріалів»

ПРИСУТНІ:

від ТОВ «ЮНАЙТЕД ПРОДАКШЕНС АТОМ» (ТОВ «ЮП АТОМ»):
Шевченко С.С. - генеральний директор;
від Сумського державного університету (СумДУ):
Іванов В.О. – д-р техн. наук, професор;
Ляпощенко О.О. – д-р техн. наук, професор;
Скиданенко М.С. – канд. техн. наук, докторант.

ПОРЯДОК ДЕННИЙ:

1. Обговорення основних напрямів науково-технічної співпраці з надання інжинірингових послуг і впровадження науково-технічних розробок (замовник - ТОВ «ЮП АТОМ», виконавець - СумДУ).
2. Розглядання пропозиції щодо розробки (удосконалення) технологічного процесу та обладнання для різання і спікання матеріалів.

ВИСТУПИЛИ:

1. Шевченко С.С. ознайомив з основними напрямками діяльності ТОВ «ЮП АТОМ»: виробництво, обслуговування і ремонт насосного, компресорного, емнісного, сепараційного, теплообмінного обладнання та іншої машинобудівної продукції для нафтогазового комплексу, підприємств енергетики. Запропонував науково-технічну співпрацю, висловив потребу з надання наукових послуг (науково-технічне консультування) і виконання науково-дослідних робіт (НДР) щодо оптимального вибору технології та обладнання для різання і спікання полімерних матеріалів, які використовуються у виробництві високоефективного енергозберігаючого обладнання.
2. Ляпощенко О.О. повідомив про готовність надати необхідні наукові послуги в повному обсязі та прийняти участь у виконанні НДР. Уточнив основні вихідні матеріали і технічні вимоги. Зазначив орієнтовні терміни виконання і попередню вартість робіт.
3. Іванов В.О. підтвердив про готовність до науково-технічної співпраці, запропонував надати відповідні послуги та наявне обладнання для виконання НДР на базі науково-навчального центру промислового інжинірингу СумДУ.


ПОСТАНОВИЛИ:

1. Після обговорення визначених основних напрямів науково-технічної співпраці між ТОВ «ЮП АТОМ» і СумДУ заявлено про наміри проведення спільних НДР з оптимального вибору технології та обладнання для різання і спікання полімерних матеріалів, які використовуються у виробництві високоефективного енергозберігаючого обладнання.
2. СумДУ підготувати та направити в строк до 11.05.2021 р. на розгляд ТОВ «ЮП АТОМ» відповідну комерційну пропозицію, що включає договір на надання наукових послуг з додатками (протокол погодження договірної ціни, планова калькуляція кошторисної вартості).

Протокол склав: Скиданенко М.С.

ПОГОДЖЕНОвід ТОВ «ЮП АТОМ»
С.С. Шевченко


від СумДУ
В.О.Іванов
О.О.Ляпощенко
М.С.Скиданенко



03.02.2021 р.

Суми

ПРОТОКОЛ
науково-технічної наради
по темі: «Технології та обладнання для виробництва гранульованих органічних (органо-мінеральних) добрив з перегною пташиного посліду»

ПРИСУТНІ:

від ТОВ «Індичка»:
Сидоренко Д.В. - співвласник;
Макаров О.Р. - технічний директор;
Зам'ятін А.Ю. - начальник відділу МТЗ;
від Сумського державного університету (СумДУ):
Склабінський В.І. - докт. техн. наук, професор, гол. науковий співробітник, зав. кафедри хімічної інженерії;
Ляпощенко О.О. - докт. техн. наук, професор, пров. науковий співробітник лабораторії грануляційного та масообмінного обладнання кафедри хімічної інженерії;
Скиданенко М.С. - канд. техн. наук, докторант, ст. науковий співробітник, нач. науково-навчального центру комплексного інжинірингу «SSUChemTech» кафедри хімічної інженерії;
Острога Р.О. - канд. техн. наук, ст. науковий співробітник, заст. зав. кафедри хімічної інженерії.

ПОРЯДОК ДЕННИЙ:

1. Обговорення основних напрямів науково-технічної співпраці з надання інжинірингових послуг і впровадження науково-технічних розробок (замовник - ТОВ «Індичка», виконавець - СумДУ).
2. Розглядання пропозиції щодо розробки (удосконалення) технологічного процесу та обладнання установки для виробництва гранульованих органічних добрив на основі пташиного посліду.
3. Ознайомлення з представленими вихідними матеріалами та документацією на дослідний (експериментальний) зразок установки. Визначення технічного завдання, технічних вимог, вихідних даних і матеріалів, інших відомостей, необхідних і достатніх для передпроектної підготовки. Обговорення та погодження основних проектних рішень.

ВИСТУПИЛИ:

1. Сидоренко Д.В. повідомив про продукцію і відходи виробництва ТОВ «Індичка». Звернув увагу на необхідність дотримання в сучасних умовах норм, вимог і рекомендацій з енергоефективності, ресурсозбереження, утилізації, екологічної безпеки. Запропонував науково-технічну співпрацю з впровадження науково-технічних розробок СумДУ (механічного, тепломасообмінного і грануляційного обладнання) на промислових об'єктах ТОВ «Індичка». Висловив прохання про надання науково-консультаційних послуг керівництву і фахівцям ТОВ «Індичка», проведення науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт (НДДКР) науковцями СумДУ щодо оптимального вибору технології, техніко-економічного обґрунтування проекту, підбору технологічного обладнання установки для виробництва гранульованих органічних добрив на основі пташиного посліду, здійснення авторського нагляду за виготовленням і монтажем устаткування, керівництва пуско-налагоджувальними роботами, а також участі в проведенні попередніх / приймальних випробувань дослідного зразка.
2. Склабінський В.І. проінформував про більш ніж 40-річний досвід з надання інжинірингових послуг і впровадження науково-технічних розробок механічного, тепломасообмінного і грануляційного обладнання (в тому числі віброгрануляторів для виробництв мінеральних добрив) науковцями лабораторії грануляційного та масообмінного обладнання кафедри хімічної інженерії СумДУ на підприємствах в Україні і за кордоном (країни СНД, Польща, Болгарія, Естонія, Індія, Катар, Куба та інші).
3. Макаров О.Р. надав відомості про кількість і основні характеристики біовідходів підприємства, які слід прийняти за проектну продуктивність (2000-3000 кг/годину) і вихідну сировину для установки з виробництва гранульованих органічних добрив. Доповів про технологічні особливості процесів ферментації перегною на основі індичого посліду. Висловив пропозицію про виробництво орґано-мінеральних добрив. Повідомив про наявність на підприємстві ТОВ «Індичка» дослідного (експериментального) зразка установки з екструдером (прес-гранулятором) продуктивністю 1000 кг/годину, який незадовільно пройшов попередні / приймальні випробування, при цьому отримано низький ресурс роботи грануляційного обладнання (інтенсивне зношування перфорованої решітки). Тому виникла необхідність в проведенні експертної оцінки, складанні звіту з висновками та рекомендаціями щодо доцільності, можливості і перспектив удосконалення (збільшення продуктивності до 2000 кг/годину) дослідного (експериментального) зразка установки, а у випадку недоцільності і неможливості відповідно розробки нових техніко-комерційних пропозицій з альтернативних варіантів технології гранулювання та апаратурного оформлення.
4. Зам'ятін А.Ю. представив структурну (ескізну) технологічну схему установки з виробництва гранульованих органічних (орґано-мінеральних) добрив за основними стадіями виробництва (сушіння, подрібнення, змішування, гранулювання, пакування), а також навів перелік і основні технічні характеристики обладнання та устаткування.
5. Ляпощенко О.О. повідомив про готовність науковців лабораторії грануляційного та масообмінного обладнання кафедри хімічної інженерії СумДУ надати необхідні наукові послуги в повному обсязі та прийняти участь у виконанні НДДКР. Зазначив орієнтовні терміни виконання 6-9 місяців і попередню вартість робіт «під ключ» (з урахуванням вартості обладнання, монтажу установки і пусконаладжувальних робіт; без врахування, у разі необхідності, вартості робіт з інвентаризації промислових відходів і викидів забруднюючих речовин у відповідності до екологічного законодавства,

вартості отримання дозвільної документації, вартості проектно-вишукувальних робіт і експертиз, потрібних для отримання замовником / підрядниками дозволу на будівництво та прокладання інженерних мереж), яка станом на момент оголошення комерційної пропозиції складає 10-15 млн. грн. Проінформував про можливість співфінансування подібних проектів за пріоритетними напрямками (енергоефективність, відновлювальна енергетика, ресурсозбереження, екотехнології) з грантових фондів ЄС. Сформулював мету і основні задачі НДДКР, уточнив основні вихідні дані і технічні вимоги. Запитав, які є в наявності й чи в достатній кількості матеріали та інші відомості, необхідні для розроблення технічного завдання (ТЗ) на складові частини НДДКР (НДР і ДКР). Запропонував попередній зміст основних етапів виконання НДДКР, а також визначив доцільним розпочати виконання НДДКР з етапу передпроектної підготовки (за окремим договором, термін виконання до 60 календарних днів, попередня вартість робіт складає 350-500 тис. грн. станом на момент оголошення комерційної пропозиції), що включатиме й технічне обстеження дослідного (експериментального) зразка установки з екструдером (прес-гранулятором) продуктивністю 1000 кг/годину.

6. Скиданенко М.С. підтвердив про готовність фахівців і науковців науково-навчального центру комплексного інжинірингу «SSUChemTech» кафедри хімічної інженерії СумДУ прийняти участь у передпроектних обстеженнях і долучитися до виконання НДДКР. Запропонував також розглянути можливість альтернативного варіанту утилізації органічних відходів виробництва ТОВ «Індичка», шляхом переробки їх у біопаливо: біогаз, який утворюється при зброджуванні біомаси, а також тверде біопаливо для твердопаливних котлів, в якості якого можуть бути використані після розкладання, сушіння і гранулювання органічних відходів у паливні гранули (пелети).

ПОСТАНОВИЛИ:

- Після обговорення визначених основних напрямів науково-технічної співпраці між фахівцями ТОВ «Індичка» і науковцями СумДУ заявлено про наміри проведення спільних НДДКР з оптимального вибору технології, техніко-економічного обґрунтування проекту, підбору технологічного обладнання установки для виробництва гранульованих органічних (органомінеральних) добрив з перегною пташиного посліду.
- Розпочати виконання НДДКР з етапу передпроектної підготовки, що включає:
 - аналіз сучасного стану і шляхів розвитку технологій та обладнання для виробництва гранульованих органічних (органомінеральних) добрив;
 - технічне обстеження і експертна оцінка дослідного (експериментального) зразка установки для виробництва гранульованих органічних добрив на основі пташиного посліду з екструдером (прес-гранулятором) продуктивністю 1000 кг/годину;
 - дослідження складу, фізико-хімічних і технологічних властивостей органічної речовини (сировина), допоміжних мінеральних елементів (добавок) та їх сумішей у складі комплексних органомінеральних добрив, а також визначення технічних вимог до готової продукції;
 - техніко-комерційні пропозиції по новому проекту (у разі необхідності), у тому числі визначення потужності виробництва, вибір методу (технології) виробництва та типу обладнання, складання структурної (ескізної) технологічної схеми установки, розрахунок матеріальних та теплових балансів виробництва, збір вихідних даних і матеріалів для складання ТЗ на складові частини НДДКР (НДР і ДКР);
 - попередній підбір потенційних підрядників на основі огляду пропозицій з ринку постачальників і виробників відповідних установок або їх складових (у тому числі основного нестандартного технологічного обладнання і допоміжного стандартного (типового) технологічного обладнання);
 - складання звіту з висновками та рекомендаціями щодо доцільності, можливості і перспектив удосконалення (збільшення продуктивності до 2000 кг/годину) дослідного (експериментального) зразка установки, а у випадку недоцільності і неможливості відповідно розробки нових техніко-комерційних пропозицій з альтернативних варіантів технології гранулювання та апаратурного оформлення.
- Розглянути можливість альтернативного варіанту утилізації органічних відходів виробництва ТОВ «Індичка», шляхом переробки їх у біопаливо: біогаз, який утворюється при зброджуванні біомаси, а також тверде біопаливо для твердопаливних котлів, в якості якого можуть бути використані після розкладання, сушіння і гранулювання органічних відходів у паливні гранули (пелети).
- З'ясувати необхідність та, у разі необхідності, вартість робіт з інвентаризації промислових відходів і викидів забруднюючих речовин у відповідності до екологічного законодавства, вартість отримання дозвільної документації, вартість проектно-вишукувальних робіт і експертиз, потрібних для отримання замовником / підрядниками дозволу на будівництво та прокладання інженерних мереж.
- Провести пошук грантових програм ЄС за пріоритетними напрямками (енергоефективність, відновлювальна енергетика, ресурсозбереження, екотехнології), а в разі наявності підготувати та подати відповідні запити на повне або часткове (співфінансування) запланованих НДДКР.
- СумДУ підготувати та направити в строк до 01.03.2021 р. на розгляд ТОВ «Індичка» відповідну комерційну пропозицію, що включає договір на надання наукових послуг (виконання науково-дослідних робіт) з додатками (технічне завдання, календарний план, протокол погодження договірної ціни, планова калькуляція кошторисної вартості) для виконання етапу передпроектної підготовки.

Протокол склали: Скиданенко М.С., Макаров О.Р.

ПОГОДЖЕНО
від ТОВ «Індичка»



Д.С. Сидоренко
О.Р. Макаров
А.Ю. Зав'язін

від СумДУ



В.І. Склабінський
О.О. Ляпощенко
М.С. Скиданенко
Р.О. Острога

Патенти на корисну модель



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **147128** (13) **U**

(51) МПК (2021.01)

B01D 17/02 (2006.01)**B01D 19/00**

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2020 06971</p> <p>(22) Дата подання заявки: 30.10.2020</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 15.04.2021</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 14.04.2021, Бюл.№ 15</p>	<p>(72) Винахідник(и): Ляпощенко Олександр Олександрович (UA), Маренок Віталій Михайлович (UA), Смирнов Василь Анатолійович (UA), Дем'яненко Марина Миколаївна (UA), Старинський Олександр Євгенович (UA), Павленко Іван Володимирович (UA), Хухрянський Олег Миколайович (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007 (UA)</p> <p>(74) Представник: Гудков Сергій Миколайович</p>
---	--

(54) ПІДІГРІВАЧ-ДЕЕМУЛЬСАТОР ТИПУ "HEATER-TREATER"**(57) Реферат:**

Підігрівач-деемульсатор типу "Heater-Treater" містить корпус, в якому встановлена перегородка, що ділить його на дві секції, секцію підігріву з розташованим в ній патрубком подачі вхідної суміші, встановленим після патрубка вхідної суміші поличковим дефлектором, закріпленими двома U-подібними жаровими трубами, до яких приєднані димові труби, та секцію відстоювання, в якій розміщений блок гідродинамічної коалесценції, патрубки відводу газу, відводу нафти та зливу води та система промивки механічних домішок. У поличковому дефлекторі вихідні отвори розміщені на одному рівні з нижньою частиною U-подібних жарових труб, а самі U-подібні жарові труби закріплені на підвісних двотаврах за допомогою рухомих механізмів, в нижній частині секції підігріву встановлені патрубки подачі прісної води, а в секції відстоювання кількість встановлених блоків гідродинамічної коалесценції дорівнює від 2 до 5, і перед кожним з них розміщений блок електростатичної коалесценції, а система промивки механічних домішок у вигляді циліндричної труби з вмонтованими відцентровими форсунками розташована вздовж всієї нижньої частини корпусу, і перед вихідним патрубком для газу розміщений блок динамічних сепараційних пристроїв для сепарації дрібнодисперсної краплинної рідини з газового потоку.

UA 147128 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **146598** (13) **U**
 (51) МПК
C23C 16/26 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
 "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2020 06806 (22) Дата подання заявки: 22.10.2020 (24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 04.03.2021 (46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 03.03.2021, Бюл.№ 9</p>	<p>(72) Винахідник(и): Сімейко Костянтин Віталійович (UA), Бородуля Валентин Алексєєвич (BY), Сасенко Сергій Юрійович (UA), Лобач Костянтин Вячеславович (UA), Кожан Олексій Пантелеймонович (UA), Дмитрієв Валерій Максимович (UA), Сидоренко Микола Андрійович (UA), Івачкін Ярослав Олександрович (UA), Марасін Олексій Володимирович (UA), Кустовський Сергій Сергійович (UA), Чумак Роман Євгенійович (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): ІНСТИТУТ ГАЗУ НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ, вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, 03113 (UA)</p>
--	---

(54) СПОСІБ ОДЕРЖАННЯ ПІРОВУГЛЕЦЮ**(57) Реферат:**

Спосіб одержання піровуглецю включає псевдозрідження вихідного дисперсного матеріалу газовим потоком, що містить вуглеводень та інертний газ, наступне нагрівання реакційної суміші та охолодження готового продукту. Спосіб здійснюють у декілька стадій, в яких, окрім першої, як вихідний дисперсний матеріал використовують подрібнений продукт попередньої стадії, а нагрівання реакційної суміші здійснюють шляхом пропускання через псевдозріджений шар електричного струму.

UA 146598 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **146599** (13) **U**
 (51) МПК
C23C 16/26 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
 "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2020 06807**
 (22) Дата подання заявки: **22.10.2020**
 (24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **04.03.2021**
 (46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: **03.03.2021, Бюл.№ 9**

(72) Винахідник(и):
**Сімейко Костянтин Віталійович (UA),
 Бородуля Валентин Олексійович (BY),
 Саєнко Сергій Юрійович (UA),
 Лобач Костянтин В'ячеславович (UA),
 Кожан Олексій Пантелеймонович (UA),
 Дмитрієв Валерій Максимович (UA),
 Сидоренко Микола Андрійович (UA),
 Івачкін Ярослав Олександрович (UA),
 Марасін Олексій Володимирович (UA),
 Писаренко Ірина Олександрівна (UA),
 Рябчук Валерій Степанович (UA)**
 (73) Володілець (володільці):
**ІНСТИТУТ ГАЗУ НАЦІОНАЛЬНОЇ
 АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ,
 вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, 03113 (UA)**

(54) СПОСІБ ОДЕРЖАННЯ ПІРОГРАФІТУ**(57) Реферат:**

Спосіб одержання пірографіту включає нагрівання вихідного вуглеводню електричним струмом та охолодження готового продукту. У реакційній зоні нагрівання створюють псевдозріджений шар з дрібнодисперсного чистого графіту шляхом пропускання через нього вуглеводню та інертного газу, а нагрівання його здійснюють шляхом пропускання електричного струму через псевдозріджений шар. Як вуглеводень використовують метан або пропан-бутанову суміш.

UA 146599 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **146619** (13) **U**

(51) МПК

C04B 35/536 (2006.01)**F16C 33/16** (2006.01)**F16J 15/16** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2020 07207**
 (22) Дата подання заявки: **11.11.2020**
 (24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **04.03.2021**
 (46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: **03.03.2021, Бюл.№ 9**

(72) Винахідник(и):
**Бондаренко Борис Іванович (UA),
 Сімейко Костянтин Віталійович (UA),
 Кожан Олексій Пантелеймонович (UA),
 Дмитрієв Валерій Максимович (UA),
 Сидоренко Микола Андрійович (UA),
 Гудков Микола Миколайович (UA)**

(73) Володілець (володільці):
**ІНСТИТУТ ГАЗУ НАЦІОНАЛЬНОЇ
 АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ,
 вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, 03113 (UA)**

(54) СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ УЩІЛЬНЮЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ТЕРМОРОЗШИРЕНОГО ГРАФІТУ

(57) Реферат:

Спосіб виготовлення ущільнюючих елементів з терморозширеного графіту включає одержання фольги шляхом прокатки порошку терморозширеного графіту у валках з поділом поверхні контакту гнучкими пористими стрічками з регулярним мікрорельєфом на поверхні, розрізання фольги на смуги, наступне намотування смуги на шток прес-форми і пресування. Перед розрізанням фольги на смуги її піддають гамма-опромінюванню з інтенсивністю 1000-1100 кГр протягом 20-30 хв.

UA 146619 U

(11) **149873**(19) **UA**(51) МПК
B01D 45/04 (2006.01)

<p>(21) Номер заявки: u 2021 04715</p> <p>(22) Дата подання заявки: 17.08.2021</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 08.12.2021</p> <p>(46) Дата публікації відомостей про державну реєстрацію та номер Бюлетеня: 08.12.2021, Бюл. № 49</p>	<p>(72) Винахідники: Ляпощенко Олександр Олександрович, UA, Дем'яненко Марина Миколаївна, UA, Старинський Олександр Євгенович, UA, Павленко Іван Володимирович, UA, Склабінський Всеволод Іванович, UA, Яковчук Вікторія Вікторівна, UA</p> <p>(73) Володілець: СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Римського-Корсакова, буд. 2, м. Суми, 40007, UA</p>
---	--

(54) Назва корисної моделі:

ПРИСТРІЙ ВЛОВЛЮВАННЯ ДИСПЕРСНИХ ЧАСТОК/КРАПЛИН/БУЛЬБАШОК З ПОТОКУ СТИСКУВАНОЇ АБО НЕСТИСКУВАНОЇ РІДИНИ

(57) Формула корисної моделі:

Пристрій вловлювання дисперсних часток/краплин/бульбашок з потоку стискуваної або нестискуваної рідини, що включає сепараційний пакет синусоїдальних пластин, який відрізняється тим, що синусоїдальні пластини виконані гнучкими, при цьому синусоїдальні пластини зі сторони подачі стискуваної або нестискуваної рідини закріплені жорстко, а зі сторони виходу стискуваної або нестискуваної рідини закріплені на рухомих опорах, для можливості видовження або стискання синусоїдальних пластин.

Акти впровадження у навчальний процес

Шаблон за версією 01
Затверджено наказом ректора СумДУ
№0527-1 від 14.11.2017 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор СумДУ

(посада)

Леонов С.В.

(підпис)

прізвище, ініціали

20__ р.

АКТ

впровадження (використання) результатів науково-дослідної роботи (етапу НДР) у навчальний процес

ДР №0120U102036 «Створення нових гранульованих матеріалів для ядерного палива та каталізаторів в активному гідродинамічному середовищі»

(номер держреєстрації, назва теми, етапу)

Етап 2 - Експериментальні дослідження активних гідродинамічних режимів та процесів що супроводжують гранулоутворення за золь-гельною технологією

яка виконана в період з січня 2021 р. по грудень 2021 р.

розроблено та обґрунтовано вибір оптимальної конструкції пристрою для генерації вимушених коливань, методику проведення експериментальних досліджень гідродинамічних характеристик процесу та фізико-механічних характеристик гранульованих матеріалів, нові способи та пристрої гранулоутворення за золь-гельною технологією, а також дані щодо впливу конструктивних елементів і характеристик вимушених коливань на гідродинамічні показники, а також структуру і монодисперсність гранул золю.

(назва результату НДР, що впроваджується)

Керівник теми

Склабінський Всеволод Іванович

(прізвище, ініціали)

Комісія в складі:

Голова комісії: декан факультету ТеСЕТ, к.т.н., проф. Гусак О.Г.

(посада, прізвище, ініціали)

Члени комісії: зав. кафедри XI, гол. наук. співробітник, д.т.н., проф. Склабінський В.І.

(посада, прізвище, ініціали)

докторант, ст. наук. співробітник, к.т.н. Скиданенко М.С.

(посада, прізвище, ініціали)

встановила впровадження в навчальний процес результатів досліджень та місце їх використання²:

1. Результати досліджень були використані при курсовому проектуванні бакалаврів (Яковчук В.В.) та магістрів (Голохвост О.О., Крощенко А.С., Шматенко В.А., Ярошенко Д.О.), при підготовці випускних кваліфікаційних робіт, а також студентських наукових робіт Голохвост О.О., Мандрика О.О. «Оптимізаційні моделювання хіміко-технологічних процесів установки підготовки вуглеводневого газу» (наук. керівник – аспірант кафедри XI Старинський О.Є.), Нічволодін К.В. Єсипчук С.С. «Дослідження процесу отримання макрогранул карбаміду для вирощування екологічних продуктів» (наук. керівник – к.т.н., ст. наук. співробітник, докторант Скиданенко М.С.), Скотар А.П. Гребенік А.Є. «Моделювання режимів роботи моногідратного абсорбера в залежності від типу насадок» (наук. керівник – к.т.н., ст. наук. співробітник, докторант Скиданенко М.С.), Гринько Д.К., Криводуб Д.Г. «Дослідження процесу охолоджувальної кристалізації персульфату амонію в класифікуючому кристалізаторі» (наук. керівник – к.т.н., ст. наук. співробітник, Михайловський Я. Е.) для участі у II турі Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт 2021/2022 н.р. У співавторстві зі студентами опубліковано 1 статтю у журналах, що входять до науково-метричних баз даних WoS та/або Scopus, 2 статті у журналах, що входять до переліку

фахових видань України та мають ISSN 4 тези доповідей у матеріалах науково-технічних конференцій та отримано 1 патент на корисну модель України.

2. Виконавцями НДР (к.т.н., ст. наук. співробітник, докторант Скиданенко М.С., ст. наук. мол. наук. співробітник Покотило В.М., аспіранти – Дем'яненко М.М., Старинський О.С., Хухрянський О.М.) розроблено інженерну методику розрахунку пульсаційного змійовикового промивача можуть бути використані у подальших прикладних розробках грануляційного обладнання для визначення оптимальних робочих режимів та отримання монодисперсних гранул носія каталізатору Al_2O_3 в тому числі при виконанні лабораторних і студентських наукових робіт на матеріально-технічній базі лабораторії грануляційного і масообмінного обладнання (ЛГМО) та науково-навчального центру комплексного інжинірингу «SSUChemTech» (нач. ННЦ «SSUChemTech» - к.т.н., ст. наук. співробітник Скиданенко М.С.) кафедри хімічної інженерії (ХІ) факультету ТеСЕТ СумДУ.

3. Виконавцями НДР (д.т.н., ст. наук. співробітник Іванов В.О., д.т.н., ст. наук. співробітник Павленко І.В., д.т.н., ст. наук. співробітник Ляпощенко О.О., к.т.н., ст. наук. співробітник, докторант Скиданенко М.С.) підготовлено та подано запит (наук. керівник – д.т.н., професор, ст. наук. співробітник Іванов В.О.) на конкурс проєктів із виконання наукових досліджень і розробок “Наука для безпеки і сталого розвитку України” національного фонду досліджень України.

4. Виконавці НДР отримали 6 індивідуальних гранти і впродовж 16.11.2020-02.03.2021 р. проходять на наукове стажування за кордоном (Technical University of Kosice, Словацька Республіка) з тематики досліджень: к.т.н., ст. наук. співробітник, докторант Скиданенко М.С. «Numerical modeling of the vibration prilling process in active hydrodynamic environment», аспірант Хухрянський О.М. «Hydrodynamic and heat and mass transfer characteristics of modular combined disk-racked contact sections», Острога Р.О. к.т.н., ст. наук. співробітник, грант на закордонне стажування у рамках Національної Стипендіальної Програми Словацької Республіки (NSP), на тему “Дослідження режимно-технологічних параметрів роботи багатоступеневих гравітаційних апаратів псевдозрідженого шару”, SAIA, п.о., (176 000 грн.).

Іванов В.О. д.т.н., ст. наук. співробітник, Павленко І.В., д.т.н., ст. наук. співробітник, Ляпощенко О.О. д.т.н., пров. наук. співробітник, грант на закордонне короткострокове стажування за темою: «Advanced Technologies in Industrial Engineering-Additive Manufacturing. Power Machinery and Robotics» у рамках проєкту DAAD “BE-ING: BEGIN DER ERFOLGREICHEN INTERNATIONALEN NACHHALTIGER GEMEINSAMEN AUSBIL (ID 57537752)” в університеті Дайсбург-Ессен, м. Дуйсбург, Німеччина (34 479 грн);

5. В результаті виконання НДР виконавцем цивільно-правового договору Дем'яненко М.М. підготовлено дисертацію «Гідродинаміка та гідроаеропружність динамічних сепараційних пристроїв» на здобуття наукового ступеня доктора філософії. Отримані наукові результати і підготовлений звіт про НДР є частиною дисертаційних робіт виконавців НДР: аспірантів Старинського О.С. «Гідродинамічні показники сепарації багатокомпонентних систем у фазних розділювачах», Хухрянського О.М. «Гідродинамічні та тепломасообмінні характеристики модульних комбінованих тарілчасто-насадкових контактних секцій»; докторанта Скиданенка М.С. «Теоретичні основи процесів вібраційного гранулювання мінеральних добрив у баштах».

6. Результати НДР частково використані при виконання господарчого договору на замовлення ПАТ «РІВНЕАЗОТ» обсягом 84 тис. грн; Договір 51.20-2021.СП/02 Науково-консультаційні послуги щодо забезпечення підтвердження відповідності продукції яку виробляє Замовник вимогам національного законодавства та удосконалення технологічних процесів їх виробництва (ТОВ "Сумська інжинірингова компанія"), загальна сума 150 000 грн; Договір 51.20-2021.СП/03 Віртуальне прототипування, конструктсько-технологічно, дослідно - конструкторські, дослідно випробувальні роботи щодо продукції яку виробляє Замовник та технологічних процесів їх виробництва (ТОВ "Сумська інжинірингова компанія"), загальна сума 102 000 грн;

“ _____ ” _____ 20__ р.

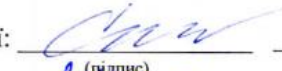
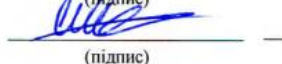
Голова комісії:


(підпис)

О.Г.Гусак

(прізвище, ініціали)

Члени комісії:


(підпис)

(підпис)

В.І.Склабінський

(прізвище, ініціали)

М.С.Скиданенко

(прізвище, ініціали)