

УДК 621.039.1; 621.039.542/.544, 661.097.3; 542.978

УКПП

№ держреєстрації 0120U102036

Інв. №

**Міністерство освіти і науки України**  
Сумський державний університет (СумДУ)  
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

**УЗАГАЛЬНЕННЯ І ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ**  
**НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ**  
(остаточний)

Керівник НДР  
д-р техн. наук, професор

В.І. Склабінський

2022

Рукопис закінчено \_\_ грудня 2022 р.

Результати роботи розглянуті науковою радою СумДУ, протокол від \_\_.12.2022 р. №\_\_

## СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР Головний науковий співробітник, д-р. техн. наук	___.12.2022	В.І. Склабінський (реферат, висновки)
Відповідальний виконавець Старший науковий співробітник канд. техн. наук	___.12.2022	М.С. Скиданенко (вступ, розд.1-4, висновки до розділів)
Виконавці: Провідний науковий співробітник, д-р. техн. наук	___.12.2022	О.О. Ляпощенко (реферат, розд.1-4, висновки)
Старший науковий співробітник д-р. техн. наук	___.12.2022	І.В. Павленко (розд.2-3)
Старший науковий співробітник канд. техн. наук	___.12.2022	Р.О. Острога (розд.4, висновки до розділів)
Виконавець цивільно-правового договору	___.12.2022	М.П. Юхименко (висновки до розділів)
Виконавець цивільно-правового договору	___.12.2022	О.Ю. Юрченко (розд. 3)
Виконавець цивільно-правового договору	___.12.2022	О.О. Мандрика (додатки)
Виконавець цивільно-правового договору	___.12.2022	О.М. Москальчук (додатки)
Виконавець цивільно-правового договору	___.12.2022	Д.І. Бондар
Виконавець цивільно-правового договору	___.12.2022	А.Р. Сергієнко

Виконавець цивільно-правового  
договору

\_\_\_.12.2022

В.А. Шматенко

Виконавець цивільно-правового  
договору

\_\_\_.12.2022

К.В. Нічволодін

## РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 184 с., 53 рис., 7 табл., 155 джерел.

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

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, комплексному застосуванні засобів вимірювання, проведення структурних досліджень, застосування САЕ-технологій та теорії ґратчастих структур у поєднанні з методами параметричної ідентифікації, нелінійного та квазілінійного регресійного аналізу, а також засобів штучного інтелекту, зокрема, штучних нейронних мереж та генетичних алгоритмів. Під час проведення експериментальних досліджень застосовано сучасні засоби вимірювання параметрів дисперсності гранул і контролю витрат індукційним способом, системи безконтактних струмових датчиків механічних коливань та їх спектральний аналіз, методи маспектрометрійного 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 автоматики, їх компіляції та програмування.

Обґрунтовано можливості інтенсифікації гідромеханічних та тепломасообмінних процесів отримання нових гранульованих речовин за рахунок накладання віброакустичних коливань. Описано загальну методiku 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-гель технологією, розроблено моделі руху краплин, осадження золю в гелі, нанесення шару покриття на модельні мікросфери. Розроблено математичні моделі впливу активних гідродинамічних і тепломасообмінних режимів, проведено числове моделювання процесу вібраційної грануляції в активному гідродинамічному середовищі гелю із застосуванням сучасних CAE-технологій та засобів штучного інтелекту. За результатами експериментальних досліджень надано рекомендації щодо режимно-технологічної та апаратурно-конструктивної оптимізації процесу гранулоутворення за золь-гельною технологією. Наведено рекомендації з вибору та обґрунтування параметрів, що впливають на характеристики отриманого продукту за золь-гельною технологією.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	8
1 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ГРАНУЛЮВАННЯ МАТЕРІАЛІВ КОМПОНЕНТІВ ЯДЕРНОГО ПАЛИВА ТА КАТАЛІЗАТОРІВ .....	10
1.1 Характеристики основних компонентів для отримання каталізаторів та ядерного палива.....	10
1.2 Вплив фізичних та хімічних властивостей золю на гранулоутворення каталізаторів .....	15
1.3 Вплив низькочастотних вимушених коливань на режими коливань крапель у процесі гранулоутворення .....	22
1.4 Реакторні установки із мікротілами.....	26
1.5 Висновки до першого розділу .....	26
2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І МОДЕЛЮВАНЬ. СТРАТЕГІЧНЕ ТА ТАКТИЧНЕ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ .....	29
2.1 Вибір та порівняльна оцінка методів досліджень .....	29
2.2 Опис експериментальних установок. Заходи з модернізації дослідного стенду .....	37
2.3 Постановка задач числових моделювань, розробка розрахункової моделі .....	55
2.4 Вибір та порівняльна оцінка методів досліджень. Оцінка похибок вимірювань та адекватності результатів моделювань .....	66
2.5 Висновки до другого розділу .....	68
3. УЗАГАЛЬНЕННЯ І ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	70
3.1 Теоретичні моделювання процесу вібраційної грануляції дисперсних матеріалів за золь-гельною технологією .....	70

3.2 Експериментальні дослідження з режимно-технологічної та апаратурно-конструктивної оптимізації процесу гранулоутворення за золь-гельною технологією.....	91
3.3 Висновки до третього розділу .....	124
4. АПРОБАЦІЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	132
4.1 Спосіб отримання гранульованого каталізатора та ядерного палива за золь-гельною технологією.....	<b>Ошибка!</b>
<b>Закладка не определена.</b>	
4.2 Спосіб отримання піровуглецю і покриття ним каталізатора та ядерного палива.....	137
4.3 Спосіб отримання пірографіту.....	139
4.4 Впровадження і перспективи використання отриманих науково-технічних результатів.....	140
4.5 Висновки до четвертого розділу.....	14342
ВИСНОВКИ.....	1464
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	152
ДОДАТКИ.....	171

## ВСТУП

Золь-гельна технологія є найбільш перспективною для отримання каталізаторів, їх носіїв, модифікованих наповнювачів високого ступеня чистоти і оптимальної дисперсності. Оксид алюмінію за своїми показниками є найбільш вдалим носієм каталізаторів.

В роботі представлена дискретна математична модель для побудови амплітудно-частотної характеристики днища гранулятора. Наведена методика проведення фізичних експериментів процесу диспергування рідини (золю), яка дозволяє оцінити вплив гідродинамічних показників та конструктивних параметрів обладнання на фізико-механічні властивості отримуваних гранул каталізатора  $Al_2O_3$ . Розроблена експериментальна установка для отримання каталізатору  $Al_2O_3$  та запропонована конструкція пульсаційного зміювикового промивача гель-сфер. Розроблено диспергуючий пристрій з магнітострикційним вібратором, який дозволяє отримувати монодисперсні краплини. Даний пристрій дозволяє підвищити продуктивність диспергуючого пристрою та надійність його роботи. Визначено місця найбільшої деформації корпусу гранулятора та характер коливань який пояснює несиметричність деформацій перфорованого днища корзини.

Представлено теоретичні та експериментальні дослідження процесу розпаду струменя рідини на краплі, який є одним з основних процесів при вібраційному диспергуванні (гранулюванні). В результаті були виявлені режими коливань краплі для різних частот.

Отримано уточнену математичну модель деформацій краплі, яка враховує експериментально задані режими. Отримані аналітичні залежності для компонент швидкості. Модель дозволяє теоретично обґрунтувати зміну знака градієнта радіальної швидкості, як причину розпаду струменя на краплі при вібраційному впливі, а також отримати аналітичні залежності для визначення діаметра і загального числа супутників.



У результаті термодинамічних розрахунків визначено основні теплофізичні параметри нанесення захисного піровуглецевого покриття на  $Al_2O_3$ , який брали в якості моделі мікросферичного ядерного палива, для випадку електротермічного киплячого шару. Експериментально доведено можливість нанесення піровуглецевого покриття на гранули  $Al_2O_3$ , які слугували у якості моделі ядерного палива. Доведено, що пірокарбонова плівка рівномірно покриває всю поверхню гранул. Цей факт підтверджує технологічні умови виробництва ядерного палива. Термодинамічними розрахунками доведена необхідність додавання в реактор інертного газу (азоту або аргону). Цей газ значно зменшує процес золотворення, а отже, зменшує забруднення навколишнього середовища.

Розроблено спосіб отримання піровуглецевого покриття на частинки каталізатора та ядерного палива. Новизною способу є нагрівання реакційної суміші та охолодження готового продукту, які 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.

# **1 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ГРАНУЛЮВАННЯ МАТЕРІАЛІВ КОМПОНЕНТІВ ЯДЕРНОГО ПАЛИВА ТА КАТАЛІЗАТОРІВ**

## **1.1 Характеристики основних компонентів для отримання каталізаторів та ядерного палива**

В сучасних технологіях каталіз має ключову роль: в фармацевтиці, нафтохімії, використанні традиційних викопних палив та виробництві палив із поновлюваних джерел, у перспективних способах отримання енергії. Вплив на економіку каталізаторів відображається такими цифрами: більше 85% усіх хімічних продуктів виробляється з використанням каталізаторів, а 15-20% економічної діяльності в індустріальних країнах безпосередньо пов'язано із використанням каталізаторів [1]. Оксиди алюмінію є одними з найпоширеніших носіїв у активних компонентах [2], зокрема, вони використовуються в каталізаторах відновлення оксиду азоту [3], з метою окислення оксиду вуглецю (CO) [4], отримання синтез газів [5], окислення аміаків [6] і інших процесів. З метою нанесення покриттів використовуються методи просочення суспензією, електрофоретичні осадження, термічні напилення, хімічні осадження із газової фази, електрохімічні осадження [7], кристалізація із розчину, тощо.

### **1.1.1 Оксид алюмінію**

У природі зустрічається тільки тригональна  $\alpha$ -модифікація оксиду алюмінію в вигляді мінералу корунду та його дорогоцінних рідкісних різновидів, зокрема таких як рубін, сапфір. Вона і є єдиною формою  $Al_2O_3$ , що є термодинамічно стабільною. За термообробки гідроксиду алюмінію близько  $400^\circ C$  отримується кубічна  $\gamma$ -форму. За температури  $1100-1200^\circ C$  із  $\gamma$ -модифікацією відбуваються необоротні перетворення в  $\alpha-Al_2O_3$ , однак швидкість такого процесу є невеликою, а для завершення фазового переходу

потрібна або наявність мінералізаторів, або ж підвищення температур обробки до 1400-1450°C [8].

Відомі ще і такі кристалічні модифікації оксидів алюмінію, як моноклінна  $\theta$ -фаза, кубічна  $\eta$ -фаза, орторомбічна  $\kappa$ -фаза, гексагональна  $\chi$ -фаза. Співним залишиться існування  $\delta$ -фази, що може бути тетрагональною або орторомбічною [9,10]. В розведених розчинах NaOH (0,1-0,5 молярний розчин) гідроксиди алюмінію виділяються в формі байеріту, у концентрованих - у формі гіббсіта [11]. За проміжних концентрацій NaOH утворюються двофазні суміші з байеріту і гіббсіта. Сумарна реакція розчинення алюмінію у лугу виражається таким рівнянням:



Осадження (кристалізація) гідроксидів алюмінію описується таким рівнянням [103]:



Продуктами процесу алюмінатного синтезу можуть також бути гідроксиди алюмінію: байерит, беміт та гіббсіт. Останній вважається цільовим продуктом у процесі Байєра. Кожен із цих гідроксидів алюмінію дасть початок відповідного поліморфного ряду оксидів алюмінію: беміт  $\rightarrow \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ; байерит  $\rightarrow \eta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ; гіббсіт  $\rightarrow \chi\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

З  $\eta$ -,  $\gamma$ -,  $\chi$ - модифікацій оксидів алюмінію  $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$  та  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  представляється інтерес для каталітичних застосувань завдяки своїм властивостям, серед яких: кислотні властивості поверхні, висока питома поверхня, стабільність за високих температур [12].

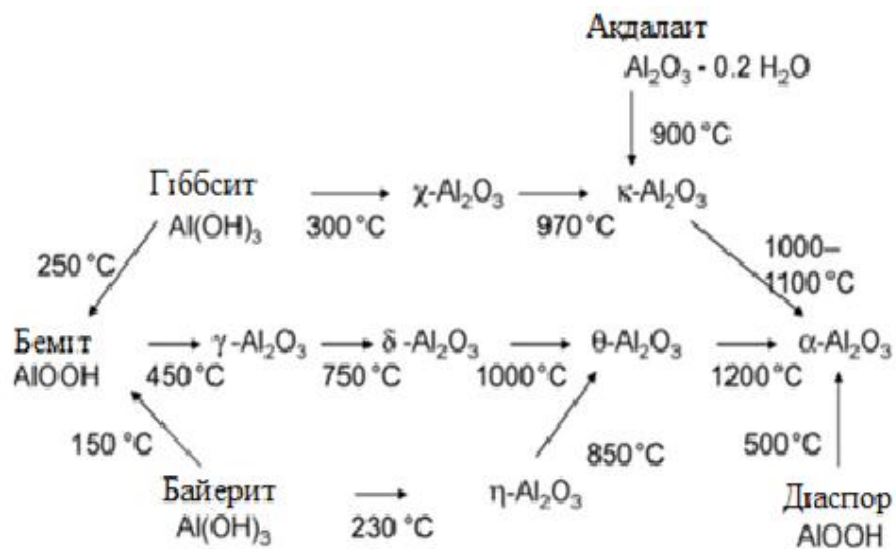


Рисунок 1.1 - Схема фазових трансформацій гідроксидів та оксидів алюмінію [13].

Оксиди алюмінію є одними з найбільш відомих та добре досліджених матеріалів, які використовуються як адсорбенти і носії каталізаторів. Визначення властивостей гідроксидів та оксидів алюмінію описано у великій кількості досліджень, частина з яких представлена в [14,15]. Оксиди алюмінію  $\eta$ -модифікації мають найбільшу питому поверхню в всіх перехідних формах оксиду алюмінію. Ряд питомої поверхні представляється так:  $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3 > \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3 \gg \theta\text{-Al}_2\text{O}_3 \gg (\chi + \gamma)\text{-Al}_2\text{O}_3 \gg \delta\text{-Al}_2\text{O}_3 > \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \approx \kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$  [15].

Найбільш широке застосування в ролі каталізаторів окислення вуглеводнів мають різні нанесені на оксиди алюмінію каталізатори з дорогоцінних металів, у першу чергу, Pt і Pd, що проявляють високу активність та стійкість до сірки та високих температур [16-19]. Паладій на оксидах алюмінію є активнішим, ніж Pt або Rh, в окисленні метану [20]. В окисленні інших вуглеводнів активнішим є каталізатор Pt /  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [21]. Нижча активність Pd /  $\text{Al}_2\text{O}_3$  каталізатору для цих вуглеводнів пов'язується з утворенням неактивних гідроксидів паладію (II) із активних оксидів паладію (II), так як кількість води, яка утворюється за спалювання 1 моля не метанового вуглеводню, є істотно більшою, ніж за спалювання метану [22,23].

Оксид алюмінію, такий як глинозем, є тугоплавкою хімічною сполукою із іонно-ковалентним типом зв'язків кристалічної решітки. Є кілька кристалічних модифікацій його. Встановлено  $\alpha$ -,  $\beta$ - та  $\gamma$ -модифікації глинозему, причому  $\alpha$ - та  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  є чистими оксидами алюмінію, а  $\beta$ -модифікації – це з'єднання оксиду алюмінію із лужними та лужно-земельними оксидами. В природних умовах зустрічаються тільки  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  в вигляді мінералів корунду, рубіну, сапфіру, який кристалізується у тригональній сингонії. Кубічний  $\gamma$ - та гексагональний  $\beta$ -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  не є стабільними модифікаціями, що за нагрівання понад  $1500^\circ\text{C}$  переходять у  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Добавка  $\text{TiO}_2$  знизить температуру спікання корунду до  $1500 - 1550^\circ\text{C}$ . Тоді утворюється твердий розчин  $\text{TiO}_2$  у  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , яким викликається спотворення кристалічної решітки корунду та, як наслідок, більш активні спікання та рекристалізація. Добавки  $\text{TiO}_2$  викликають інтенсивні зростання зерна корундової кераміки до  $200 - 350\text{мкм}$ . Ряди добавок затримують зростання кристалів корунду. Порівняно сильно даний ефект проявляється за введення  $\text{MgO}$ . За введення в шихту  $0,5-1\%$   $\text{MgO}$  розміри кристалів спеченої кераміки не перевищують  $2-10\text{мкм}$ . Це поясниться утвореннями на поверхні корунду магнезійної шпінелі з мікронних прошарків, якими затримується зростання кристалів. Дрібнозернисті структури корунду із добавкою  $\text{MgO}$  покращують механічні властивості корунду. Зниження температур спікання корунду з введенням  $\text{MgO}$  не спостерігається.

Слід виділити, що у вирішальній мірі характеристики міцності корундової кераміки залежать від властивостей вихідного порошку (чистота, дисперсність, активність) та технології отримання матеріалу, а також варіюються у широких межах. При цьому міцність гарячепресованої кераміки із ультрадисперсного порошку  $\text{Al}_2\text{O}_3$  досягає  $650\text{ МПа}$ . Корунд відрізнятиметься високою хімічною стійкістю з огляду на кислоти і луги. За нормальних температур на нього практично не впливає плавикова кислота. Корунд є стійким до дії більшості з розплавів лужних металів [24].

### 1.1.2 Кераміка на основі $\text{UO}_2$

Діоксиди урану мають температуру плавлення  $2872^\circ\text{C}$ . Інші ж оксиди урану розкладаються за порівняно низьких температурах. При цьому щільність  $\text{UO}_2$  складає  $10,97\text{ г/см}^3$ .  $\text{UO}_2$  має гранецентровану кубічну форму типу флюориту та основні властивості, не розчиняється у соляній кислоті, але добре розчиняється у азотній кислоті, царській горілці та суміші азотної та плавикової кислот. Дана речовина з  $\text{KOH}$  не реагує, однак реагує із перекисом натрію, із  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{BeO}$ , не взаємодіє аж до температури  $1800^\circ\text{C}$ . Діоксиди урану є стійкими аж до температур плавлення тільки у чистому водні чи вакуумі. Тому, використовувати кераміку із  $\text{UO}_2$  можна лише у відновлювальному чи нейтральному середовищі. Із цих же причин вироби із  $\text{UO}_2$  спікають у середовищі інертних газів або в вакуумі.

Діоксиди урану одержуються хімічною переробкою з уранових руд, у першу чергу, мінералів уранініта, зміст  $\text{UO}_2$  у якому досягається 50-60%. Вироби із  $\text{UO}_2$  отримуються пресуванням із органічними пластифікаторами, шлікерного лиття та протяжкою. Для здійснення процесу пресування виробів необхідний тиск близько 70 МПа. Стрижні із  $\text{UO}_2$  виготовляються гідростатичним пресуванням чи протяжкою. Спікаються вироби із  $\text{UO}_2$  у вакуумі чи в середовищі нейтрального газу за температури  $1750^\circ\text{C}$ . При цьому, характеристики міцності спеченої кераміки  $\text{UO}_2$  знаходяться на рівні показників  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Термічна стійкість виробу з  $\text{UO}_2$  є невеликою, що пов'язано із досить великим коефіцієнтом термічних розширень.

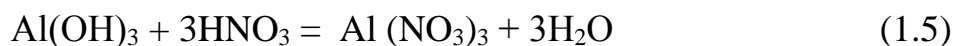
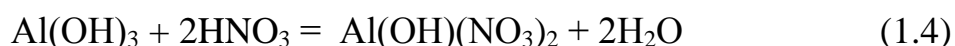
Діоксиди урану набули широкого застосування у ролі реакторного палива у вигляді тепловиділяючого елемента в реакторах різних типів.  $\text{UO}_2$  можуть бути використані або в диспергованому вигляді у керамічних чи металевих матричних системах, або ж у вигляді виробів - брусків, дисків, стрижнів, таблеток та ін. [24-26]. У роботі [27] відмічено, що у процесі окислення оксидів вуглецю (II) висуваються дуже специфічні вимоги щодо носію каталізатора. Кращим із носіїв є оксид алюмінію, а дуже поганими носіями виявилися випробувані алюмосилікати (цеоліти) та силікагелі.

## **1.2 Вплив фізичних та хімічних властивостей золю на гранулоутворення каталізаторів**

Слід підкреслити, що властивості технічних керамік, наприклад, механічні, у вирішальній мірі залежатимуть від технології по отриманню вихідної сировини, компактування і спікання виробів. Тому, матеріал одного і того ж хімічного складу, однак отримані за різних способів, матимуть якісно різні фізико-хімічні та механічні характеристики й найрізноманітніші сфери по застосуванню.

### **1.2.1 Вплив співвідношення $\text{Al(OH)}_3$ : $\text{HNO}_3$ на фізико-хімічні властивості золю**

Склад гідроксиду алюмінію описується простою формулою  $\text{Al(OH)}_3$ , яка не є коректною, адже він існує у декількох модифікаціях. На сьогодні відомо, що існують шість гідратів, при цьому на одну молекулу  $\text{Al}_2\text{O}_3$  припадатимуть відповідно 3; 2,5; 2; 1,5; 1 та 0,5 молекул  $\text{H}_2\text{O}$ . Але, не дивлячись на наявність кількох гідратів, рентгеноструктурними дослідженнями не підтверджено наявності в них кристалічної решітки окремо молекул оксидів алюмінію та води: елементами структури, при цьому, будуть іони  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{O}^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$  чи  $\text{Al}^{3+}$  і  $\text{OH}^-$ . Дані сполуки необхідно розглядати як гідроксиди і оксогідроксиди алюмінію. В залежності від співвідношень вмісту гідроксидів алюмінію до азотної кислоти є можливим протікання реакцій отримання різних гідроксонітратів алюмінію у відповідності з рівняннями:



Отримання нітратів алюмінію із його оксиду протікатиме за рівнянням:



В підтвердження вище наведених рівнянь у роботах [28,29] досліджено термоліз гідроксонітратів алюмінію, що отримані розчиненням свіжо осаджених гідроксидів алюмінію, у стехіометричній кількості азотної кислоти. Даний процес протікав при порівняно невисокій температурі. Чітко проявилось їх багатостадійне розкладання, а саме поступові відщеплення хімічно зв'язаної води та денітрація. При втратах маси за температури 1000 °С встановлено зміст молекул кристалогідратної води у формулах сполук, а у втратах маси, з відповідними переломам на термогравіметричних кривих, - проміжні продукти з розкладання сполук (табл. 1.1). З метою порівняння наведено дані для нітрату алюмінію  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  [30]. У роботах відмічено, що за нагрівання протікатиме їх багатостадійне розкладання: поступові відщеплення хімічно зв'язаної води та денітрація. По даним комплексного термічного аналізу авторами визначено склад продуктів розкладу гідратованих солей  $\text{Al}(\text{OH})(\text{NO}_3)_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2\text{NO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  та  $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{NO}_3 \cdot k\text{H}_2\text{O}$  у температурних інтервалах 40-800°C. Виявлено, що до 157 °С відщеплюватиметься кристалогідратна вода (у дві стадії). У ході первинної дегідратації відщеплюватиметься найбільш слабо зв'язаної у кристалічній решітці вода (0,5-0,8 молекули  $\text{H}_2\text{O}$ ). Згодом протікатиме вторинна дегідратація, а саме, - відділення залишків кристалогідратної води. При збільшенні вмісту гідроксогруп у з'єднанні даний процес полегшиться, про що свідчив зсув відповідних температурних інтервалів в сторону ще більш низьких температур. За температури 190 - 241 °С нітрат перейде в нітрит (приблизно за однакових температур для всіх вивчених сполук). Потім (при 249 - 376 °С) відбудуватиметься денітрація та видалення хімічно зв'язаної води із аніонів солей із утворенням беміту  $\text{AlOOH}$ , що згодом й формуватиме перехідні форми в оксиду алюмінію. За термолізу  $\text{Al}(\text{OH})_2\text{NO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  та  $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{NO}_3 \cdot k\text{H}_2\text{O}$  у процес денітрації на кладеться відщеплення частин хімічно зв'язаної води, а тому термогравіметричні криві у даній стадії



матимуть найбільш складний характер. У результаті усі гідроксонітрати, порівнюючи з нітратом алюмінію, перетворюються в беміт  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , що підтверджено даними рентгенофазного аналізу.

Таблиця 1.1 - Результати розрахунків процесу розкладання [29]

Номер стадії	$\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}(\text{OH})(\text{NO}_3)_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}(\text{OH})_2\text{NO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{NO}_3 \cdot k\text{H}_2\text{O}$
	$x = 9$	$m = 6,8$	$n = 6,3$	$k = 6,3$
I	-0,5 $\text{H}_2\text{O}$	-0,8 $\text{H}_2\text{O}$	-0,8 $\text{H}_2\text{O}$	-0,7 $\text{H}_2\text{O}$
II	-8,5 $\text{H}_2\text{O}$	-6,0 $\text{H}_2\text{O}$	-5,5 $\text{H}_2\text{O}$	-3,2 $\text{H}_2\text{O}$
III	-3O	-2,0 O	- O	- O
IV	-0,5( $\text{NO} + \text{NO}_2$ )	-( $\text{NO} + \text{NO}_2$ )	-0,5( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ) -0,5 $\text{H}_2\text{O}$	-0,5( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ) -1,5 $\text{H}_2\text{O}$
V	-	-0,5 (0,47) $\text{H}_2\text{O}$	-0,5 (0,48) $\text{H}_2\text{O}$	-1 (0,93) $\text{H}_2\text{O}$

Таблиця 1.2 - Результати елементного аналізу нітрату та гідроксонітратів алюмінію [29].

Показник	З'єднання			
	$\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}(\text{OH})(\text{NO}_3)_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}(\text{OH})_2\text{NO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{NO}_3 \cdot k\text{H}_2\text{O}$
Вміст H, %(розрахунок)	4,75(4,80)	5,11 (5,03)	6,16 (6,18)	4,80 (4,72)
Вміст молекул $\text{H}_2\text{O}$	8,9	6,8	6,3	3,9
Вміст N, %(розрахунок)	11,19 (11,20)	9,73 (9,64)	5,96 (5,92)	5,03 (5,16)

Густина водного розчину нітрату алюмінію за температури 18 °C приведено в роботі [83]:

Таблиця 1.3 - Щільність водних розчинів нітрату алюмінію за температури 18 °С [30]

Концентрація	1 %	2 %	4 %	6 %	8 %	10 %	12 %	14 %
Густина, г/л	1006,5	1014,4	1030,5	1046,9	1063,8	1081,1	1098,9	1117,1
Концентрація	16 %	18 %	20 %	24 %	28 %	30 %	32 %	—
Густина, г/л	1135,7	1154,9	1174,5	1215,3	1258,2	1280,5	1303,6	—

### 1.2.2 Вплив ПАР і її концентрацій на процес отримання сфер

ПАР несе значний вплив на отримання сфер при їх виробництві за зольгельною технологією. У роботах [31,32] для синтезу вихідного золю взято водний розчин  $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ , осаджено аміаком гідроксид алюмінію, що далі пептизовано оцтовою кислотою. Потім, отриманий гідро золь стабілізували ПАР (Span80). Виявлено, що додавання 2,5% ПАР сприятиме утворенню мікросфер. Концентрації ПАР нижчі за 2,5 об'ємних % не є ефективними за формування сферичних частинок. Дані дослідів наведено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Форма частинок у залежності від концентрації ПАР та в'язкості золю [84]

№ п/п	Концентрація ПАР, об. %	В'язкість золя, мПа·с	Результати отримані на електронному мікроскопі
1	2,0	14-15	Переважають великі розбиті сфери
2	2,0	21-22	Переважають розбиті сфери + частинки нерегулярної форми
3	2,5	10-12	Практично всі частинки сферичні
4	2,5	15-16	Практично всі частинки сферичні
5	2,5	21-22	Переважають сфери + невелика кількість розбитих сфер
6	2,5	25-26	Сфери + розбиті сфери
7	2,5	28-30	Переважають великі розбиті сфери

Про вплив ПАР на якість продуктів, що отримані за золь-гель технологією, відмічався у роботах [33,34]. У джерелах [35-43] розглянуто питання з матричного синтезу, у тому числі й із використанням ПАР, що привели до створення матеріалу з відкритою пористістю та високою питомою поверхнею в основі оксидів та оксигідроксидів алюмінію. Найбільш зрозуміло питання впливу ПАР з їх використанням в золь-гель процесах розглянуто в роботі [44]. Там приводяться результати досліджень впливу концентрацій неіоногенного ПАР на склад та фізико-хімічні властивості дисперсного оксигідроксиду і оксиду цирконію, алюмінію, вольфраму (VI), заліза (III) і хрому (III). Виходячи з цих досліджень виявлено фізико-хімічні особливості по застосуванню ПАР у створенні мезопористих матеріалів із необхідними властивостями. Крім того, визначено вплив природи розчинника та концентрації ПАР на механізм по формуванню матеріалів в розчинах кінетику і створенню методології синтезу різних дисперсних наноматеріалів з застосуванням ПАР та розробці механізмів по їх отриманню. Слід відмітити, що у наведених роботах у основному розглянуто питання по отриманню оксидних наноматеріалів, в той час як для використання у промисловості значну цінність відіграють гранули з діаметром  $1,5 \times 10^{-3} \text{ м}$  -  $5,0 \times 10^{-3} \text{ м}$ . Тому, для вивчення впливів ПАР на процеси гранулювання золю проведено лабораторні досліді за таких умов. З метою приготування золю взято порошок з гідроксиду оксиду алюмінію ( $\text{AlOOH}$ ) у кількості 0,2272 масових частин, а також азотну кислоту, у кількості 0,0240 масових частин (у перерахунку на 100%  $\text{HNO}_3$ ) і воду. Процес по їх змішуванню здійснювався протягом 30 хвилин. Згодом, отриманий золь краплями при допомозі голки діаметром 0,001 м подавався в ємність, що була заповненою речовиною задля гелювання (з розчином аміачної води з концентрацією 20 %). У ході проведення дослідів відмічено, що введення ПАР у кількості 0,1-0,25 % до розчинів аміаку зменшило силу (коефіцієнт) з поверхневого натягу останнього. Таким чином, це призвело до покращень гідродинамічних параметрів руху краплі золю у площині розподілу фаз, а саме: газ  $\rightarrow$  рідина, і прискорення процесу з надходження краплі до аміачної води. Діаметр крапель (гранул), в середньому, складав  $2,0 \times 10^{-3} \text{ м}$ . Час

з формування гранул у ємності становив 15 с. Виходячи із цього, за модернізації дослідної установки слід було б передбачити можливість по додаванню ПАР у золь або у рідину для гелювання.

### **1.2.3 Вплив чистоти та концентрації $\text{HNO}_3$ та вмісту $\text{H}_2\text{O}$ на властивості золю.**

Виробництво каталізаторів чи їх носіїв висуває високі вимоги в якості (чистоті) вхідних компонентів. Наявність різних домішок у цих речовинах погіршить якість уже готового продукту. Прикладом тому, ПАТ «Нижнекамскнефтехим» використовував каталізатор дегідратації, що отримувався на основі псевдобеміту українського виробництва [34,35]. У джерелі [45] для приготування золю оксиду алюмінію у якості вихідної речовини використано кристаллогідрати нітрату алюмінія  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , у якості рідини при затвердінні - водні розчини аміаку  $\text{NH}_4\text{OH}$ . При цьому, кількість солі нітрату натрію розраховано, виходячи із необхідного значення в масовій частці дисперсної фази у золі у перерахунку в  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Гідроліз нітратів алюмінію проводився при  $200\text{ }^\circ\text{C}$ . Регулювали кислотності середовища здійснювалося за допомогою водного розчину азотної кислоти (1 м) та водного розчину аміаку. У досліджених золів  $\text{Al}_2\text{O}_3$  за концентрації 0,1 - 3,2 % виявлено стабільність розмірів частинок у золю оксиду алюмінію протягом певного часу (7 діб). Усі синтезовані золі були близькими до монодисперсного складу: за концентрації дисперсних фаз в розчині 3,2% розміри золів  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (А) та  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (В) становили 18-20 нм та 38-40 нм відповідно. Із введенням у водний розчин діетиламіну спостерігалось збільшення розмірів частинок золю оксиду алюмінію. Тому, основні з характеристик золів оксиду алюмінію приведені в табл.1.5 [45].

Таблиця 1.5 - Основні характеристики золів оксиду алюмінію

Золь	$C_{\text{золя}}, \%$	pH	$\rho, \text{г/см}^3$	$\mu, \text{мПа с}$	$R_{\text{ср}}, \text{нм}$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (A)	3,2	3,51	1,113	1,015	22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (B)	0,9	3,62	1,185	1,045	38

#### 1.2.4 Вплив геометричної форми гранул продукту на його властивості

Ефективність роботи каталізаторів, а також їх носіїв і сорбентів у промисловому обладнанні характеризується не тільки фізико-хімічними властивостями, але і, багато в чому, визначається їх геометричною формою.

Сферичні каталізатори дають змогу знизити перепади тиску у трубчастій печі чи створюють резерви для підвищення продуктивності реконструкцій у процесі конверсії вуглеводнів [46]. Враховуючи, що у процесі каталізу братиме участь, в основному, лише поверхневий прошарок, то каталізатор у вигляді сфер дозволить забезпечити максимальні контакти сировини із поверхнею каталізатору та підвищення його технічних показників (наприклад, активності) та якості. У зв'язку із цим, розроблялися нові каталітичні матеріали в формі сфер. Перспективним методом по отриманню каталізаторів є золь-гель метод [47-49].

У роботі [50] запропонований спосіб по отриманню сферичних гранул CuO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> каталізатору методом крапельних формувань. Сферичні CuO- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> каталізатори досліджено у комплексі фізико-хімічних методів та випробувано у процесі спалювання бурого вугілля у киплячому шарі, наведено результати досліджень по впливу температурної обробки (700 та 800 °C) на міцність, активність та фізико-хімічні властивості CuO- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> каталізатору. Представлено, що отримані каталізатори мають високу активність у реакції окислення CO, а також механічну міцність по роздавлюванню і стиранню. Випробування CuO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> каталізатору у процесі спалювання бурого вугілля у киплячому шарі виявило, що використання такого каталізатора дає можливість досягнення високого ступеня вигорання бурого вугілля, що складає 95 %, викиди CO в димових

газах склали 600 ppm, а це нижче, ніж в промислового залізо місткого каталізатору ІК-12-74А (3000 ppm).

Каталізаторам, гранульованим сорбентам чи їх носіям потрібно мати високу міцність, що необхідна з метою збереження вихідних форм гранул у процесах транспортування та роботи у обладнанні, а також високу пористість з забезпеченням високої активності. Найкраще такі процеси організуються при використанні в виробництві шароподібних каталізаторів. Виходячи з цього, бажаним є використання сорбентів у вигляді гранул з розміром від 2 мм до 4 мм, каталізаторів – розміром 3 мм - 5 мм [51,52]. В джерелі [53] авторами приведено результати досліджень з впливу параметрів процесів гранулоутворення на фракційний склад грануляту.

### **1.3 Вплив низькочастотних вимушених коливань на режими коливань крапель у процесі гранулоутворення**

Процеси по створенню гранульованих матеріалів ядерного палива і каталізаторів включають кілька стадій по приготуванню вільнодисперсної системи, диспергуванню, формування гранул рідини для затвердіння, відвод гранул із рідиною для затвердіння у сепарацію [54,55] із подальшим відводом рідини для затвердіння на формування гранул.

Отримання крапель має вирішальне значення у створенні нового грануляційного обладнання і гранульованих матеріалів ядерного палива і каталізаторів саме при диспергуванні рідини у перфорованій оболонці в вібраційному обладнанні [56].

При цьому, немає єдиного механізму по розпаду струменю рідини [57], а ті різні механізми з розпаду рідини на краплі [58] характеризуються її фізичними властивостями [59] і конструктивними параметрами в устаткуванні.

Теоретичне дослідження процесів розпаду струменю рідини на краплі з власних коливань [60] являється першим важливим етапом у теоретичних і експериментальних дослідженнях з розробки надійних математичних

моделей та створенню методики розрахунку у проектуванні грануляторів. У таких моделях потрібно використовувати розпад рідин на краплі [61] із подальшою кристалізацією [62]. При цьому, вивчення фізичного процесу, що впливає на розмір крапель, дає змогу створити нове обладнання (диспергатори, гранулятори), щоб отримувати монодисперсні гранули [62]. У зв'язку із цим теоретичний опис з руху струменю рідини заснований на теорії струменів [63,64].

Б. Холіним та В. Склабінським розроблено та представлено основи з інтенсифікації внутрішніх потоків в краплі, яка рухається у потоках газу з поперечними градієнтами швидкості. В джерелі [65] показано процес диспергування рідкої фази перфорованих оболонок [66], щоб створити устаткування по виробництву азотних добрив [67]. Диспергування та його характеристики при масообмінних процесах у імпульсних колонах з дією розчинників представлено в джерелі [68]. Модель осьової дисперсії задля оцінки коефіцієнту масопереносу з обертовим перфорованим диском представлено у дослідженні [69], а у джерелі [70] запропоновані розрахункові підходи вирішення теплових та аеродинамічних задач обладнанні із перфорованими оболонками.

Поведінка струменю рідини при виході з отворів залежатиме від різних умов. При цьому, осесиметрична еліпсоїдальна форма крапель, що утворюються, постійно змінюється. Тому, осі в еліптичного меридіонального перетину струменю змінюються в черзі з дією капілярних сил [71,72], а амплітуда таких коливань зменшується, тоді поверхнею струменя втрачається стійкість через нестійкості хвиль [73], глобальну нестійкість, що викликана поверхневим натягом [74], поява нестійких мод Релея - Плато [75], проява нестійкості вільної поверхні граничних шарів [76], зміна швидкості газу [77], а це, згодом, спричинює розпад струменя рідини у краплі.

Результатом теоретичних і експериментальних досліджень Склабінського В.І. та Скиданенка М. С. є підтвердження наявності власних поперечних коливань у струменя за зміни радіальної компоненти швидкості. Подібні

дослідження по впливу частоти коливань для стабільності форми краплі [78] та її монодисперсності [79] показано в роботах [80,81].

У процесі витікання рідини із отворів гранулятора критичну швидкість розпаду струменю на краплі визначаємо з умови рівноважного стану як рівність сил поверхневого натягу [29] та опору навколишнього середовища [30]:

$$\sigma \pi d = 3 \mu v_{cr} \pi d, \quad (1.7)$$

де  $d$  - діаметр краплі;

$\sigma, \mu$  - коефіцієнт поверхневого натягу та, відповідно, динамічна в'язкість;

$v_{cr}$  - значення критичної швидкості.

Результатом є отримання залежності:

$$\sigma v_{cr} = \frac{\sigma}{3\mu}. \quad (1.8)$$

Для ламінарних струменів вираз (1.8) показує, що від розмірів крапель, що утворюються, критична швидкість не залежатиме. Тому, доцільним є створення наукових та теоретичних основ по контролю утворення краплі із використанням ефекту накладених вимушених коливань з режимами коливань краплі.

Підкреслимо, що дана залежність відповідатиме наступному з критичних значень безрозмірного критерію:

$$Ca_{cr} = \left( \frac{We}{Re} \right)_{cr} = 0.33, \quad (1.9)$$

де  $Ca$  - число капілярності (критерій подібності у гідродинаміці, що визначається відношенням сил в'язкого тертя до поверхневого натягу);



$Re$  - число Рейнольдса визначається;

$We$  - критерій подібності, що показує відношення сил інерції до сил поверхневого натягу:

$$Ca = \frac{\mu v}{\sigma}; Re = \frac{\rho v d}{\mu}; We = \frac{\rho d v^2}{\sigma}, \quad (1.10)$$

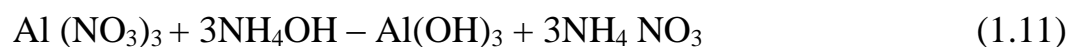
де  $\rho$  - щільність;

$v$  - швидкість.

Згідно з виразом (1.2), створення керованих впливів на процеси розпаду струменю на краплі заданих розмірів і ступеню монодисперсності вібраційні ефекти слід використовувати в вібраційних грануляторах.

### **1.3.1 Вплив властивості рідини для затвердіння на характеристики отриманого продукту**

Краплі золю, сформовані у стадії диспергування, подаватимуться до рідини з метою затвердіння, що знаходиться у ємності. У якості рідини затвердіння є можливість використання розчину аміачної води. Тоді відбуватиметься реакція з гелювання золю нітрату алюмінію по формулі:



Швидкість протяжності цієї реакції залежатиме від температури протікання реакції, а також діаметру крапель золю і концентрації аміачної води. Збільшення діаметра крапель вимагатиме більше часу на протікання процесів гелювання і навпаки. Збільшення концентрації аміачної води веде до прискорення протікання реакцій та зменшення часу для процесу гелювання крапель золя. При цьому, на стадії гелювання відбуватиметься також і процес формування гранул. За входження крапель у рідину відбуватиметься відхилення від шароподібності форми. Тому, проводячи досліди, слід

оптимізувати параметри, такі як: концентрація аміачної води – зміна геометричних параметрів гранул – висота колони гелювання.

#### **1.4 Реакторні установки із мікротілами**

МТ є паливною мікросферою із матеріалу, який ділиться за рахунок нейтронного опромінення (діоксиди плутонію, урану, торію і ін.) із шарами захисних покриттів [82,83]. Такі покриття на МТ ядерних реакторів виконують різні функції, серед яких - утримання продуктів поділу у середині частки [84]. Переваги із застосування МТ показано в роботі [85]. Палива на основі МТ є основними для газоохолоджуваних високотемпературних реакторів (ВТГР) [86], а реактори типу ВТГР відносяться до ядерних енергетичних систем по класифікації IV покоління [87].

Кілька років Інститутом газу НАН України проводилися дослідження по одержанню піровуглецевих покриттів задля різних цілей, серед яких і покриття моделей МТ. Результатом цьому є напрацювання партії пірокапсульованого матеріалу із вмістом піровуглецю 6 - 97% мас [88-92].

#### **1.5 Висновки до першого розділу**

1. Золь-гельна технологія є найбільш перспективною для отримання каталізаторів, їх носіїв, модифікованих наповнювачів високого ступеня чистоти і оптимальної дисперсності.

2. Оксид алюмінію  $Al_2O_3$  за своїми показниками є найбільш вдалим носієм каталізаторів, а дуже поганими носіями виявилися випробувані алюмосилікати (цеоліти) та сілікогелі.

3. З  $\eta$ ,  $\gamma$ ,  $\chi$  модифікацій оксидів алюмінію  $Al_2O_3$  саме модифікації  $\eta$  та  $\gamma$  представляють практичний інтерес для каталітичних застосувань завдяки своїм властивостям, серед яких: кислотні властивості поверхні, висока питома поверхня, стабільність за високих температур.

4. Оксиди алюмінію  $\eta$ -модифікації мають найбільшу питому поверхню у всіх перехідних формах оксиду алюмінію.

5. Діоксиди урану  $UO_2$  набули найбільш широкого застосування у ролі реакторного палива у вигляді тепловиділяючого елементу в реакторах різних типів.

6. Золь-гельна технологія дозволяє програмувати фазовий склад і структуру ще на стадії отримання золю та проведення процесу гелювання.

7. В залежності від співвідношень вмісту гідроксидів алюмінію до азотної кислоти є можливим протікання реакцій отримання різних гідроксонітратів алюмінію:  $Al(OH)_2(NO_3)$ ,  $Al(OH)(NO_3)_2$ ,  $Al(NO_3)_3$ .

8. З метою покращення властивостей продукту та геометричних характеристик гранул у золь-гельних технологіях пропонується використовувати ПАР та створювати на поверхні рідини для гелювання шар нейтральної рідини для формування гранул.

9. ПАР несе значний вплив на отримання сфер при їх виробництві за золь-гельною технологією. Виявлено, що додавання 2,5% ПАР сприятиме утворенню мікросфер. Концентрації ПАР нижчі за 2,5 об'ємних % не є ефективними за формування сферичних частинок.

10. Синтезовані золі є достатньо близькими до монодисперсного складу: за концентрації дисперсних фаз в розчині 3,2% розміри золів  $Al_2O_3$  (А) та  $Al_2O_3$  (В) становили 18-20 нм та 38-40 нм відповідно. Із введенням у водний розчин діетиламіну спостерігається збільшення розмірів частинок золю оксиду алюмінію.

11. Ефективність роботи каталізаторів, а також їх носіїв і сорбентів у промисловому обладнанні визначається їх геометричною формою. Сферичні каталізатори дають змогу знизити перепади тиску у трубчастій печі чи створюють резерви для підвищення продуктивності обладнання.

12. Каталізатор у вигляді сфер дозволяє забезпечити максимальні контакти сировини із поверхнею каталізатору та підвищує його активність та якість.

13. Для отримання крапель достатньо монодисперсного складу більш раціональним є застосування вібраційного диспергування (гранулювання) для

створення контрольованого впливу на процес розпаду струменя на краплі заданого розміру, форми і ступеня монодисперсності з точки зору залежності критичної швидкості краплі від діаметра.

14. Для раціонального проведення процесу гелювання слід оптимізувати параметри, такі як: концентрація аміачної води – зміна геометричних параметрів гранул – висота колони гелювання.

## 2 ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І МОДЕЛЮВАНЬ. СТРАТЕГІЧНЕ ТА ТАКТИЧНЕ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

### 2.1 Вибір та порівняльна оцінка методів досліджень

Як згадувалося вище, процес по отриманню гранул  $Al_2O_3$  за золь-гельною технологією складається з кількох стадій, від особливостей протікання яких та властивостей сировини, залежать монодисперсність і фізико-хімічні властивості гранули (міцність, діаметр гель-сфер та насипна густина) [93-105].

Також, необхідно звертати увагу на спосіб нанесення захисного покриття (піровуглецю) на гранули, що покращують фізико-хімічні властивості (поверхневу міцність) [106-109].

При цьому, одним із важливих питань, що слід розглядати, є остання стадія у життєвому циклі ядерного палива - його утилізація і дезактивація територій, що забруднені радіоактивними речовинами [110,111]

**Експериментально-дослідна установка для отримання каталізатора  $Al_2O_3$ .** Методику експериментальних досліджень процесів диспергування золю по використанню обертового віброгранулятора висвітлено у звіті за 1 етап даної НДР [93, 94, 96]. З метою дослідження впливів режимних параметрів роботи такого обладнання - установки по виробництву каталізаторів  $Al_2O_3$  на властивості гранули слід провести серію фізичних експериментів.

Першу серію експериментів направлено на визначення залежності між частотою коливань, витратами ПАР (поверхнево-активних речовин), діаметром отвору корзини обертового віброгранулятора і вмістом води у діаметрі гранул й насипну густина після процесу сушіння, після прокалювання гранул. Крім того, в ході експерименту слід оцінити довжину нерозривних струменів золю.

Другої серією експериментів має бути визначено вплив масових відношень порошку до кислоти ( $Al(OH)_3:HNO_3$ ), а також частоти коливань і

частоти обертання вібраційного гранулятора по таким властивостям гранул, як насипна густина, міцність і монодисперсність. Методику визначення міцності і насипної густини гранул описано в джерелі [93].

**Витікання струменя золя через отвір з врахуванням його нахилу та циркуляції перед отвором.** В момент роботи промислової установки по отриманню каталізатору  $Al_2O_3$ , а саме, - диспергатора рідини, у результаті впливу кількох факторів, таких як перекосу осі і нерівномірності подачі рідини, витрати рідини розраховуються аналітичними способами. Тому, дослідження по витіканню круглими отворами, за наявності додаткових факторів, можуть в нести корективи у математичні моделі і аналітичні залежності і, як наслідок, підвищити достовірність та ефективність розробленого методу.

З метою визначення параметрів з витікання рідини круглими отворами в тонкій стінці із перпендикулярно розташованою до вертикальної віссю є достатня кількість вказівок [112, 113, 114]. При цьому, дані рекомендації стосуються витікань за нормальних умов по підведенню рідини до отворів.

Для визначення необхідних параметрів по витіканню за наявності інших умов, серед яких нахил осі отвору чи наявність циркуляції потоків перед отвором, ті рекомендації майже відсутні.

Витрата за процесу витікання через отвір визначаються за формулою:

$$Q = \mu F_0 \sqrt{2gH} \quad (2.1)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт витрати;

$F_0$  – площа отвору;

$H$  – тиск, наявний над отвором.

При наявності вільної поверхні в атмосферного тиску,  $H$  дорівнюватиме висоті в стовпі рідини над отворами.

Коефіцієнти витрат визначаються за виразом:

$$\mu = \varphi \delta \quad (2.2)$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт швидкості;

$\delta$  – коефіцієнт стискання на виході.

Величина коефіцієнту витрати залежатиме від багатьох факторів, адже на нього впливатимуть усі фактори, із якими пов'язано коефіцієнт стиснення струменю  $\delta$  та коефіцієнт швидкості  $\varphi$ .  $\mu$

Дослід над протіканням рідини по отвору у тонких стінках проводився з водою. Коефіцієнт витрати  $\mu$  у інших рідин, а також впливи температур рідини на  $\mu$  майже не досліджені. У рекомендаціях джерела [115] пропонується прийняти такі значення  $\mu$ :

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

$$\mu = \varphi = \frac{Re}{48} \quad (2.3)$$

При  $25 < Re < 200 - 400$

$$\mu = \frac{Re}{1.5 + 1.4 Re} \quad (2.4)$$

(найбільшим значенням  $\mu_{max}$  є 0.69, а у інших дослідження можна зустріти значення  $\mu_{max} = 0.72$ );

За  $200 - 400 < Re < 10000$

$$\mu = 0.592 + \frac{0.27}{\sqrt{Re}} \quad (2.5)$$

За  $10000 < Re < 300000$

$$\mu = 0.592 + \frac{5.5}{\sqrt{Re}} \quad (2.6)$$

За  $Re > 300000$  коефіцієнт витрат  $\mu$  майже не змінюватиметься і складатиме 0.595 чи, приблизно, 0.6. Число Рейнольдса, у даному випадку, розраховуватиметься по залежності:

$$Re = \frac{\sqrt{2gH \cdot d}}{\nu} \quad (2.7)$$

де  $d$ - діаметр отвору;

$\nu$  – кінематична в'язкість рідини.

По виразах (2.3 - 2.6) видно: зі збільшенням в'язкості рідини, має місце зростання коефіцієнту витрати. Якщо відбувається неповне стиснення струменю, величина коефіцієнту витрати  $\mu_H$  складатиме показник, більший коефіцієнту витрати  $\mu$  для повного стискання [114,115]:

$$\mu_H = \mu \left( 1 + c \frac{n}{x} \right) \quad (2.8)$$

де  $c$  - коефіцієнт, який враховує форми отворів. Даний коефіцієнт для круглих отворів є рівним 0.13, а для прямокутних - 0.15;

$n$  - периметр частини контуру отворів, де відсутні стискання;

$x$  – периметр усього отвору.

Недосконалі стиснення можуть враховуватися в залежності від співвідношень площі  $\omega$  та загальної площі для  $\Omega$ , де розташований отвір:

$$\mu_H = \mu \left[ 1 + 0.641 \left( \frac{\omega}{\Omega} \right)^2 \right] \quad (2.9)$$



Використовуючи вище зазначені рекомендації, здійснено розрахунок коефіцієнту витрати всіх випадків закінчення та порівняно з досвідченими даними. Щодо збігу із нахилом отвору із попередньою циркуляцією, - необхідне детальне дослідження питань як теоретично, так і експериментально.

**Змійовиковий промивач гель-сфер.** Досліджуючи гідродинаміку процесу промивання гель-сфер в змійовиковому промивачі, слід провести дослід, по вивченню залежності швидкості з переміщення гель-сфер в змійовику від переліку параметрів, зазначених в таблиці 2.1. Дослідження проводилися по методу "відсічок". Його сутність полягає в тому, що до змійовика подавалися гель-сфери, які промивалися з постійною витратою. З виходом з установки у режим та заповнення змійовика піском, здійснювалося відключення змійовика з системи, тобто "відсікання". Згодом, гель-сфери вивантажувалися зі змійовика, просушувалися і зважувалися.

Таблиця 2.1 – Параметри, які впливають на швидкість по переміщенню гель-сфер в змійовиковому промивачеві.

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	$\omega_{cp} = \varphi(K_3)$

Маючи значення витрати гель-сфер і їх кількість у змійовику, є можливість визначення часу заповнення змійовика:

$$\tau_3 = \frac{G_4}{Q_4} \quad (2.10)$$

де  $\tau_3$  – час заповнення змійовика, с;

$Q_4$  – масові витрати гель-сфер, які промиваються, кг/с;

$G_4$  – вага частинок в змійовику, кг.

Середня швидкість по переміщенню частинок в змійовику:

$$\omega_{\text{ср.ч}} = \frac{L}{\tau_3} \quad (2.11)$$

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

$L$  – довжина труби змійовика, м.

**Магніострикційний спосіб диспергування золю.** У момент роботи на малих отворах (100 мкм та менше) виникає велика ймовірність забиття їх домішками і за рахунок гелювання розчинів в отворі, що є можливим за досягнутих швидкостей, стікання розчину із отворів (до 2,5 - 3 м/с).

Представляється великий практичний інтерес дослідженням можливості використання магніострикційного вібратору підвищеної частоти аж до ультразвукових частот із метою збільшення у 2 - 3 рази швидкості по стіканню гелюючого розчину. Варто припустити, що, у цьому випадку, вдалося б істотно зменшити ймовірності забивання отворів домішками чи гель-частинками.

Більше того, використання магніострикційного вібратору дає змогу зробити диспергуючі пристрої більш компактним та збільшення у кілька разів продуктивності фільтр (отворів стікання).

Відомо, що вібродиспергування засновано на властивостях струменю рідини, яка витікає із постійною швидкістю, під впливом певних збурень з постійною частотою, розпадатися у монодисперсні краплі. Показник частоти вібрації в такому процесі має задовільнити умову [116]:

$$f = \frac{V}{(3,5 \div 7)d_{\text{стр.}}}, \quad (2.12)$$

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

З рівняння (2.12) видно, що зі зростанням швидкості струменя, частота коливань, які збурюються, має зростати лінійно.

Іншою необхідною умовою у монодисперсного розпаду струменю є інтенсивність збурення, що має бути такою, аби довжина суцільної частини струменю задовольняла умову:

$$\lambda \leq l \leq 3\lambda, \quad (2.13)$$

де  $l$  – довжина суцільної частини струменя (від отвору);

$\lambda = (3,5 \div 7)d_{\text{стр.}}$  – ефективна довжина струменя.

Для освоєння промислових монодиспергувань рідин представляється цікавістю інтенсифікації продуктивності струменю, тобто збільшення швидкості. Це вимагатиме відповідного підвищення частот збурених коливань. При цьому, в існуючих конструкціях електродинамічних та електромагнітних вібраторів із підвищенням частот коливальна потужність буде зменшуватися.

Магніострикційний вібратор, на відміну від вище зазначеної конструкції вібраторів, при значних значеннях частот матиме велику коливальну потужність. Така властивість магніострикційного вібратора обумовлюється поєднанням резонуючого стрижню з магніострикційного матеріалу та котушки із збуджуванім нею електромагнітним полем. Застосування магніострикційного вібратора для низької частоти (менше 10 кГц) є недоцільним через велику довжину резонуючих стрижнів, адже довжина стрижню знаходитиметься в залежності, обернено пропорційній від частоти [116]:

$$l = \frac{k}{2f} C, \quad (2.14)$$

де  $k$  – порядок гармонії;  
 $f$  – частота;  
 $C$  – швидкість звуку у матеріалі стрижня.

В той же час, застосування магнітострикційного вібратора невеликих розмірів з метою диспергування струменю рідини у великих швидкостях стікання та високих частот буде доцільним. Конструкція вібраційного диспергатора з магнітострикційними вібраторами є компактною, надійною в роботі.

Однією із умов по проведенню процесу монодиспергування буде узгодження швидкості стікань струменю з частотою вібрації. В схемі установки швидкість струменю рідини визначатиметься тиском рідини у головці, що диспергує. Швидкість струменю рідини, яка впливає із мікроотворів, не розраховується за рівнянням виду:

$$V = \varphi \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad (2.15)$$

Для визначення залежностей швидкості стікання струменю рідини від тиску використовують формулу:

$$V = f(p) \quad (2.16)$$

На підставі даних експерименту будується графік. Тиск рідини задаватиметься за допомогою пневмопідпори і вимірюватиметься зразковим манометром, а швидкість, при цьому, вимірюватиметься об'ємним методом.

Діапазон робочих швидкостей струменя визначається по формулі (2.12):

$$V_{min} = f \cdot 3,5d_{стр.} = 15000 \cdot 3,5 \cdot 160 \cdot 10^{-6} = 8,4 \text{ м/с}, \quad (2.17)$$

$$V_{max} = f \cdot 7d_{стр.} = 15000 \cdot 7 \cdot 160 \cdot 10^{-6} = 16,8 \text{ м/с.} \quad (2.18)$$

У посудині встановлюється розрахунковий мінімальний тиск. Вмикатиметься вібратор. Спостерігаючи за розпадами отруєння, поступово збільшується тиск до максимального значення. За отримання стійкого монодисперсного розпаду реєструється робочий діапазон тисків, по якому і визначатиметься діапазон робочих швидкостей.

За випробування магнітострикційного вібратору із частотою 15 кГц і фільтери із діаметром отвору 160 мкм оптимальним режимом отримання монодисперсних капель буде режим при  $P_{min} = 0,7$  ати і  $P_{max} = 0,82$  ати, а це відповідає швидкостям  $V_{min} = 10,2$  м/с і  $V_{max} = 11,8$  м/с. В процесі випробування регулювалася інтенсивність збурення зміною вихідної потужності генератору, що вимірюється в відсотках по шкалі приладу. При випробуванні є можливість регулювання інтенсивності випромінювання так, аби довжина суцільної частини струменю відповідала  $l = 3\lambda$ .

Проведеними випробуваннями підтверджено принципову можливість в диспергуванні мікроструменю рідини, що стікала із відносно великими швидкостями за використанні магнітострикційного вібратору високої частоти.

Встановлено також і можливість накладань вібрації на корпус через шари рідини (масла), яке створює переваги при розробках і конструюванні вібраційного диспергатору.

## **2.2 Опис експериментальних установок. Заходи з модернізації дослідного стенду**

### **2.2.1 Експериментально-дослідна установка для отримання гранул каталізатора $Al_2O_3$ за золь-гель технологією**

Експериментально-дослідна установка по виробництву кулькового носія каталізатору матиме такі технічні характеристики: продуктивність готового продукту ( $Al_2O_3$ ) - до 50 кг/год, розміри гранул носія каталізатору -

$(1,2 \div 2,8) \pm 0,2$  мм, і може змінюватись у даному діапазоні залежно від режимних параметрів у роботі установки.

Технологічний процес з отримання кулькового носія каталізатору скрадатиметься із таких стадій (рисунку 2.1):

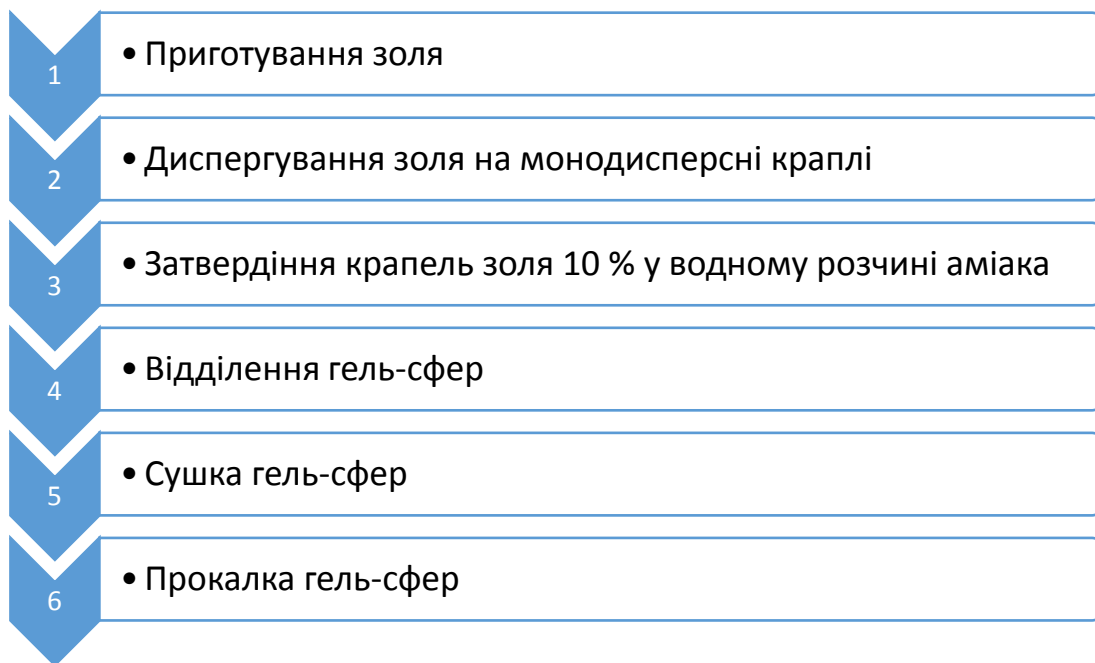


Рисунок 2.1 – Стадії процесу отримання каталізатору  $Al_2O_3$

Установка по отриманню кулькоподібних носіїв каталізатору (рисунку 2.2) працює за таким принципом. Порошкоподібний  $Al(OH)_3$  із бункеру з поз. E201 ваговим дозатором з поз. Д.301 подаватиметься в змішувач з поз. С101. Туди в змішувач з поз. С101 з ємності з поз. E202 насосом-дозатором з поз. Д302 надходитиме вода і з ємності з поз. E203 насосом-дозатором з поз. Д304 надходитиме 65 % водний р-н азотної кислоти. У змішувачі з поз. С101 відбуватиметься усереднення даних компонентів із отриманням золю.

Для запобігання заляганню продуктів на бункері з поз. E201 встановлено вібратор періодичної дії. Зі змішувача з поз. С101 насосом-дозатором з поз. Д303 отриманий золь подаватиметься через систему фільтрів у диспергатор з поз. Д102. Насос-дозатор з поз. Д303 забезпечуватиме необхідну витрату золю, який подається до диспергатору ( $\approx 256$  кг/ч) і накладатиме пульсації тиску у

потік золя з метою отримання монодисперсних крапель. Струмінь золю, стікаючи із отворів диспергатора з поз. Д102, розпадатиметься на монодисперсні краплі у об'ємі колони з поз. К103. Потрапляючи у 10 % водний розчин аміаку, який знаходитиметься в колоні з поз. К103, краплі тверднуть. З метою поліпшення якісних характеристик гель-сфер у колоні з поз. К103 передбачено подачу ПАР та гасу. Отримані у колоні, гель-сфери, через переливи разом з розчином аміаку, надходять у відділювач з поз. О104, де відбуватиметься їх відділення з розчину аміаку. Варто зазначити, що у якості відділювача запропоноване використання пульсаційного змійовикового промивача. З відділювача з поз. О104 гель-сфери надходять у сушарку з поз. С105. Сушарка гель-сфер проводиться повітрям, підігрітим до температур 200 - 350 °С. Висушені при цьому гель-сфери із сушарки з поз. С105 надходять у піч прокалки з поз. П106.

Повітря у сушарку з поз. С105 подаватиметься вентилятором з поз. В109. Нагрівання повітря здійснюватиметься у трубчастих теплообмінниках з поз. Т107, Т108. Для нагрівань повітря у теплообміннику з поз. Т107 використовуватиметься відведене повітря із сушарки з поз. С105, а у теплообміннику з поз. Т108 у якості теплоносія використовуватиметься перегрітий пар. Очищення газу, що утворюватиметься при роботі установки, може бути здійсненим як у системі газоочистки з діючого виробництва, так і, по вимозі замовника, у автономній ділянці з газоочистки, що може входити в комплект установки.

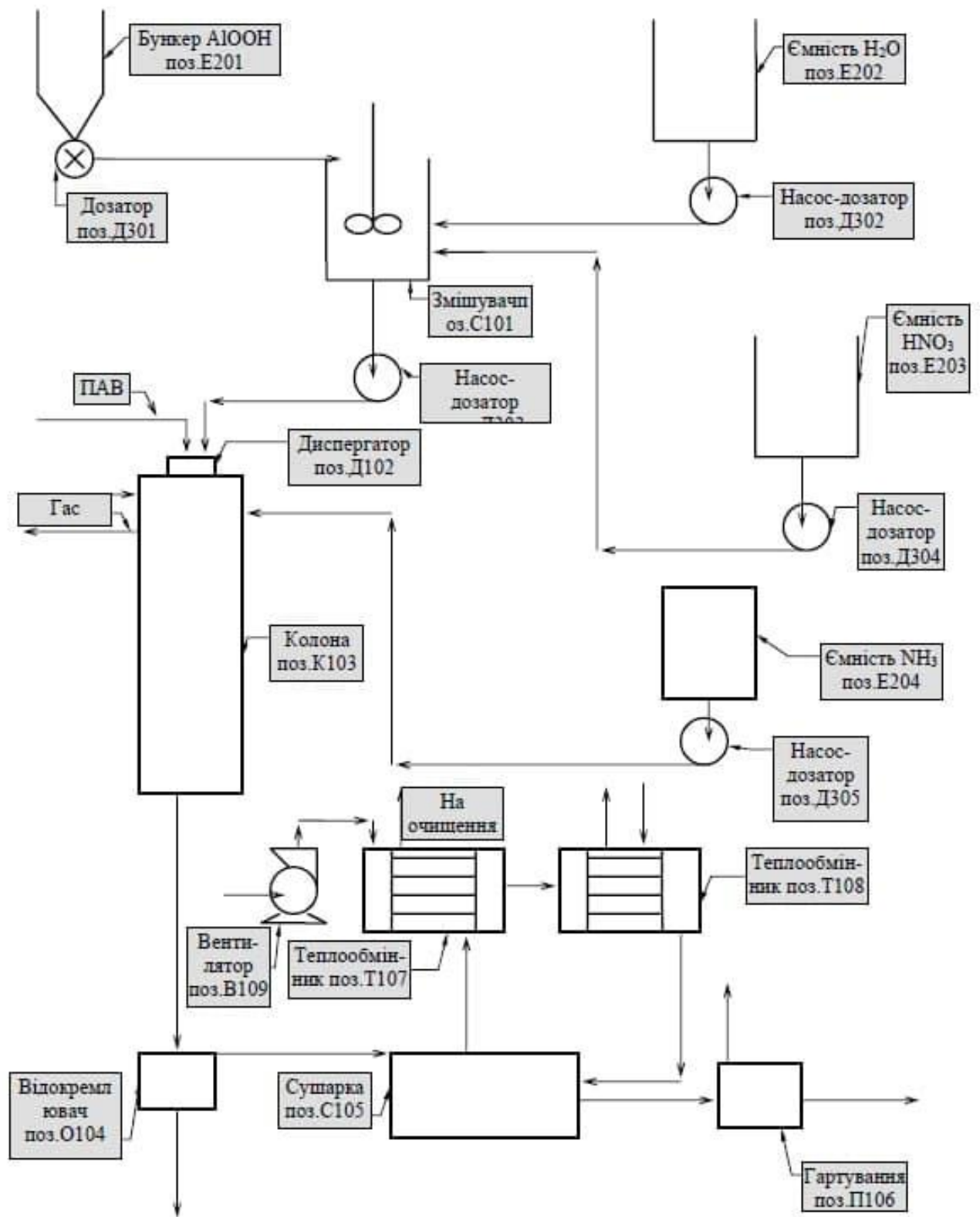


Рисунок 2.2 – Принципова технологічна схема експериментально-дослідної установки з виробництва кулькового носія каталізатора



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

Для дослідження поставлених завдань були спроектовані та виготовлені спеціальні установки (рисунки 2.3 та 2.4). Установкою, що представлена на рисунку 2.3, дається можливість дослідження витікань струменю із нахилом і без нахилу отвору. Нахил досягатиметься шляхом повертання чи вивертання гвинта, що розташований в ніжці штативу.

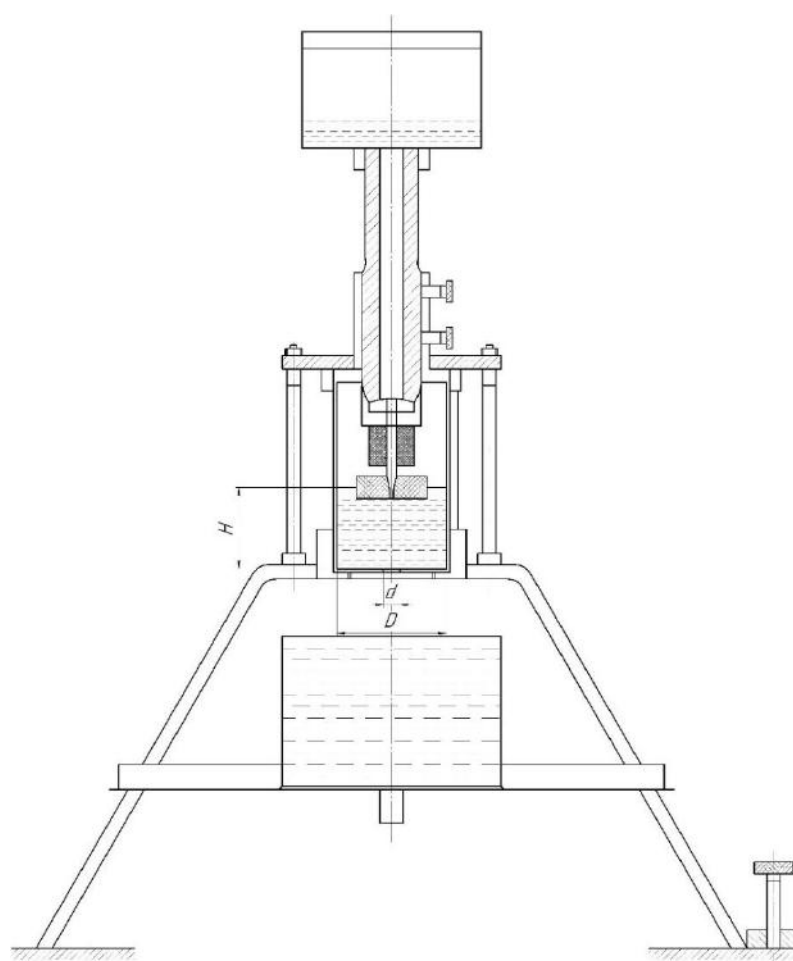


Рисунок 2.3 – Установка по дослідженню витікання струменя із урахуванням нахилу отвору

Зміна діаметрів отворів вироблялася шляхом заміни стаканів. Постійний рівень в стакані підтримувався і за рахунок спеціального пристрою - "клапан-поплавок". Поплавком спостерігався рівень, і, будучи ще жорстко з'єднаним із

клапаном, автоматично підтримувався рівень в стакані будучи постійним протягом усього часу випробування. Зміна рівня води у стакані відбувалася шляхом підйому чи опускання штанги разом з стежачим пристроєм.

Для досліджень впливу циркуляції по стіканню експериментальну установку приведено на рисунку 2.4. Цю установку зібрано на базі установки І із тією зміною, що і мала спеціальний стакан з 20-ма рівномірно розподіленими за висотою соплами. Сопла виходили у стакан по дотичній, це давало можливість забезпечення певної циркуляції у стакані. Для цього подавалася через сопла певна кількість рідини  $q$  з визначеним тиском.

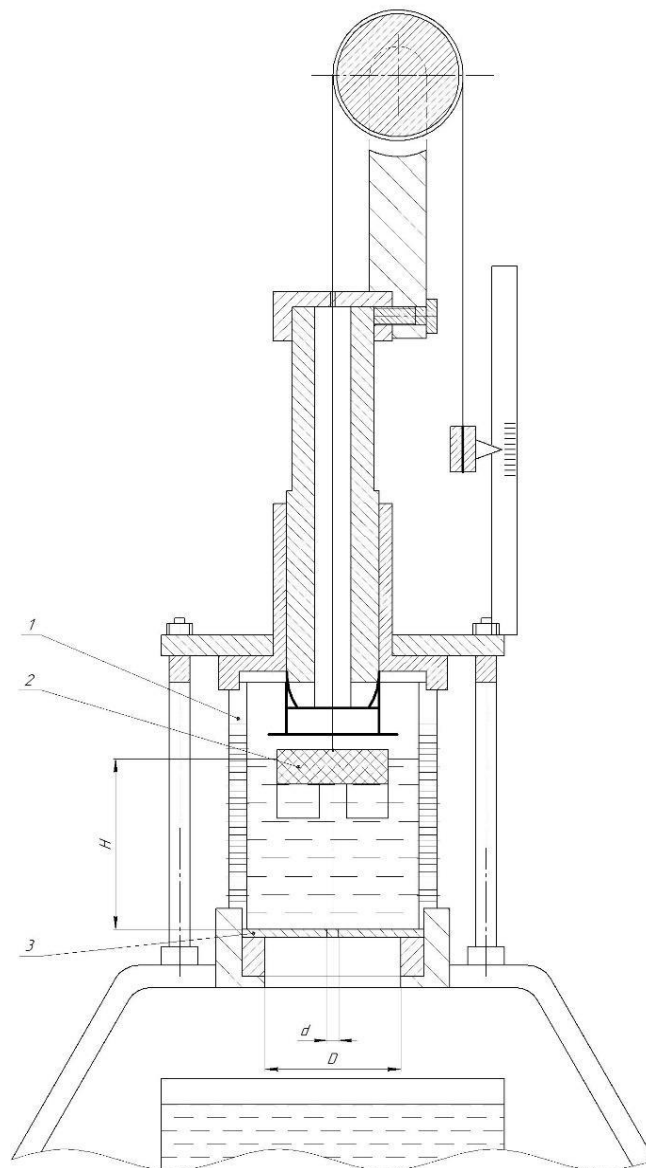


Рисунок 2.4 – Установка по дослідженню витікання струменя із врахуванням циркуляції перед отвором

Тиск у колекторі та в соплах контролювався при допомозі п'єзометру. Це давало можливість точно виставити потрібний тиск. Зміни тиску в колекторі вироблялися шляхом дроселювання води, яка виходила на злив із колектору. Діаметри отворів змінювалися за рахунок замін денців.

Варто відзначити, що проектуючи установку, спочатку передбачалася зміна циркуляції за допомогою вертушки та стробоскопу. Але, як показав досвід, обидва способи не дали можливості визначення значень.

За постійної циркуляції у стакані ( $\Gamma = const$ ) шари рідини у різних радіусах рухалися із різною окружною швидкістю. Її епюру вздовж радіусу можна представити в вигляді гіперболічного закону:

$$V_u = \frac{\Gamma}{2\pi r} \quad (2.19)$$

Відповідно, і вертушка, що поміщена у рідину показуватиме незрозумілу кутову швидкість.

Умова існування вихору представляється у вигляді

$$\frac{V_{uB}^2}{2g} = Z, \quad (2.20)$$

де  $Z$  – відстань з вільної поверхні до розглядуваного перерізу вихору;

$V_{uB}$  – окружна швидкість в поверхні вихору у розглядуваному перерізі вихору.

Тобто, питому кінетичну енергію на поверхні вихору прирівнюють до потенціальної енергії положень.

Вихрова трубка матиме лійкоподібну форму, а перерізи у вихрової трубки немов би ковзатимуть один відносно іншого. Чим менше є значення  $Z$ , тим більшим є радіус і меншим  $V_{uB}$ . Ця обставина буде робити спостереження вихору з допомогою стробоскопу більш важким, так як за допомогою

останнього, є можливість "зупинки", лише одного перерізу, а інші не будуть обертатися.

Більше того, для визначення циркуляції не є достатнім лише "зупинення" перерізу. Потрібно ще і визначити його діаметр, а це за допомогою стробоскопу здійснити неможливо. Тому, для визначення циркуляції у стакані з достатньою точністю є можливість користування передбаченими у даній роботі методами.

### **2.2.3 Змійовиковий промивач установки отримання кулькового носія каталізатору**

Пульсаційний змійовиковий промивач призначається для безперерного дифузійного відмивання гель-сфер з розчином аміаку. Такий промивач (рисунок 2.5) складається із вузла, де введення гель-сфер 1, змійовика 5 та вузла виведення гель-сфер 6.

До вузла виведень приєднано пульсатор 8 та патрубок введення для промиваючих рідин (розчину аміаку). Розчини аміаку надходитимуть до напірного баку 10, а злиття відпрацьованого розчину аміаку проводитиметься за рахунок переливного пристрою вузла. До вузла виведення також приєднуватиметься і збірник промитих гель-сфер 7. Пульсатор буде приводитися в дію за рахунок приводу пульсатора 9.

Робота пульсаційного змійовикового промивача гель-сфер заключатиметься в тому, що гель-сфери через вузел введень надходитимуть у змійовик. При цьому, туди ж, через вузол виведень гель-сфер, надходитиме розчин аміаку. Рух гель-сфер і розчину аміаку є протиточним. Переміщення гель-сфер в змійовику здійснюватиметься за рахунок гідравлічного імпульсу, що створюватиметься пульсатором. Характер гідравлічного імпульсу є таким, що за прямого руху розчину аміаку у змійовику швидкість буде меншою за швидкість винесення гель-сфер, та гель-сфери залишаться на місці, а за зворотного руху розчину аміаку швидкість буде більшою за швидкість винесення, і гель-сфери переміщатимуться на деяку відстань. Адже гідравлічні

імпульси подаватимуться безперервно - переміщення гель-сфер в змійовику буде безперервним.

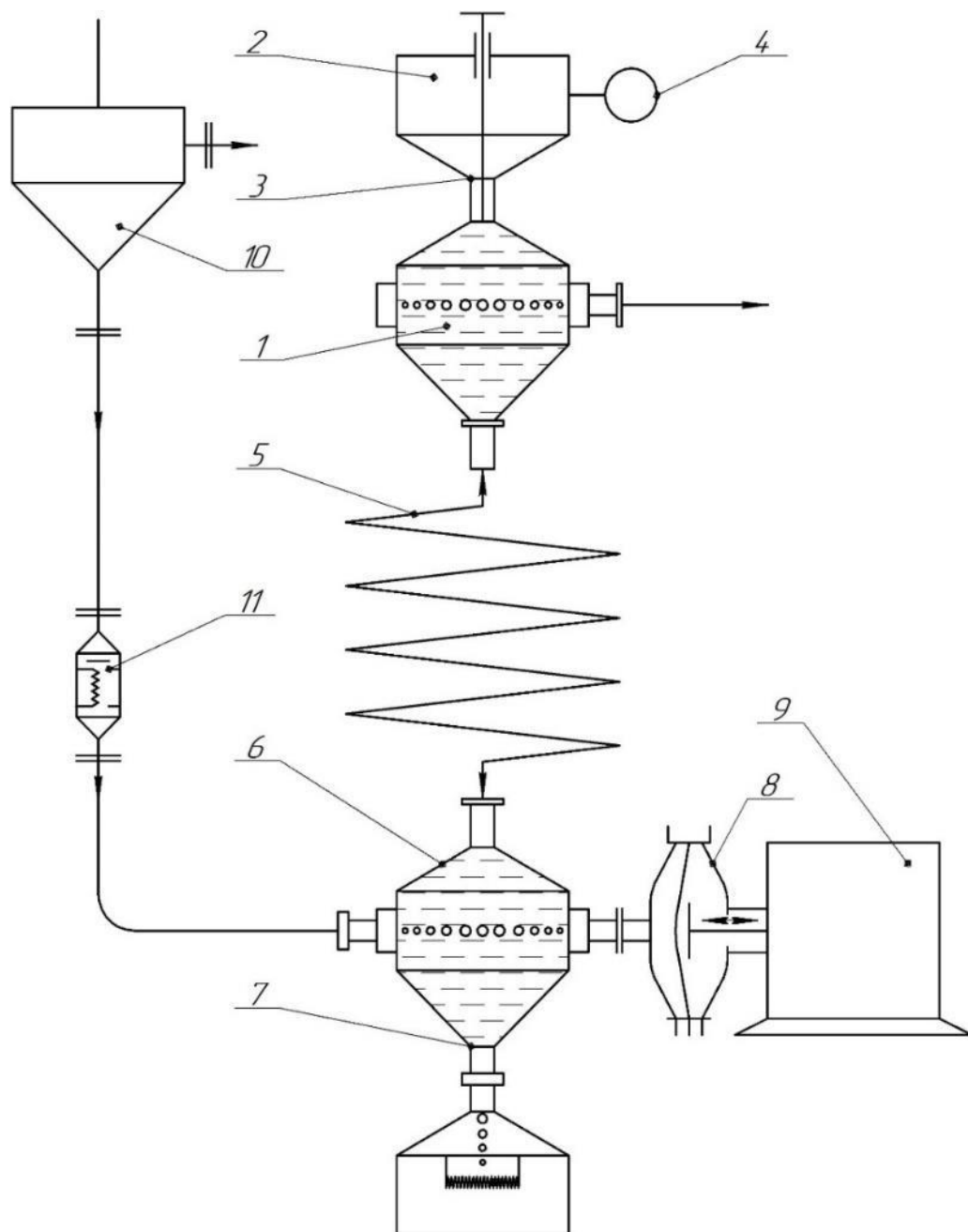


Рисунок 2.5 - Пульсаційний змійовиковий промивач гель-сфер

Величина переміщень гель-сфер за один хід пульсатора визначається за формулою:

$$l = k \cdot \frac{D^2}{d_{\text{вн.}}^2}, \quad (2.21)$$

де  $l$  – величина з переміщення гель-сфер з одного хіоду пульсатора;

$D$  – ефективний діаметр діафрагми пульсатора;

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

$k$  – коефіцієнт, що враховує сили інерції гранул, рідини, вплив прикордонних шарів рідини і т.д.

Середня швидкість з переміщення гель-сфер у зміювику визначається по рівнянню:

$$\omega_{\text{ср.г.}} = fl, \quad (2.22)$$

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

$f$  – частота гідроімпульсів, які подаються.

Виходячи із рівнянь (2.28, 2.29), середня швидкість по переміщенню гель-сфер залежатиме від частоти гідроімпульсів та геометричних характеристик пульсатора та зміювика. Таким чином, змінюючи дані параметри, є можливість регулювання часу промивання гель-сфер.

У даній установці застосовано діафрагмовий пульсатор із пневматичним приводом (рисунок 2.6), який виключає можливість витоків промиваючого середовища та забезпечує прості регулювання швидкості по переміщенню гель-сфер.

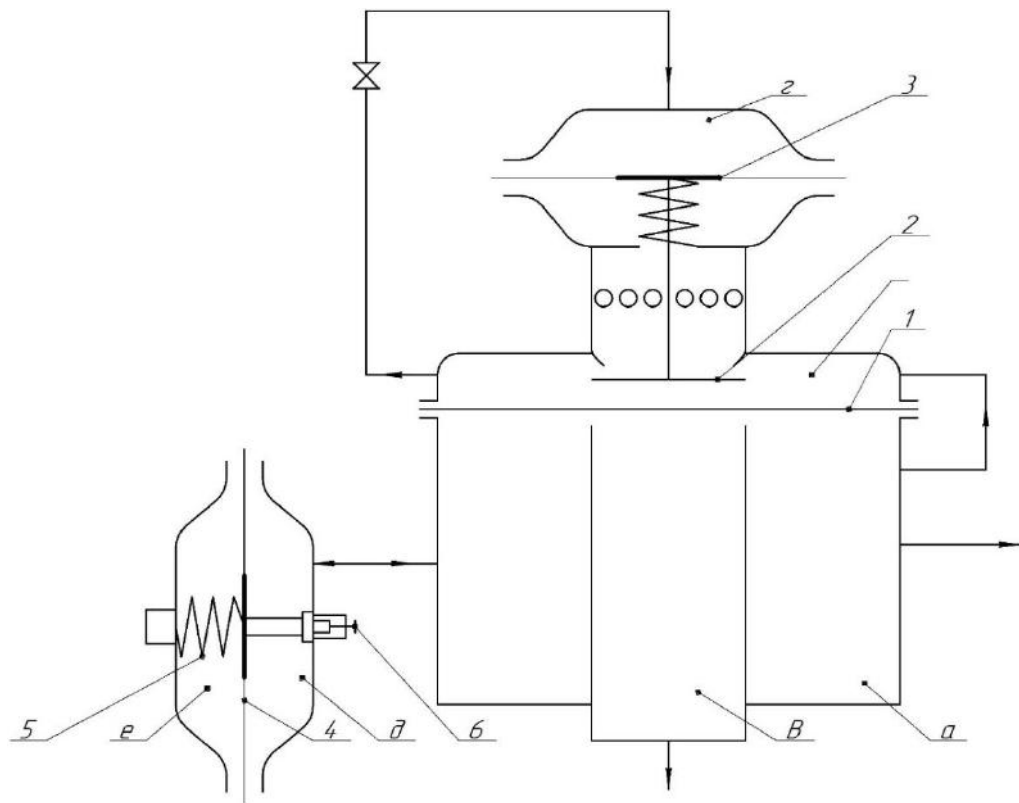


Рисунок 2.6 - Генератор пневматичних імпульсів

Діафрагмовий пульсатор - це своєрідна камера, розділена гнучкою діафрагмою 4 (рисунок 2.6) в дві порожнини – «е» та «д». Порожнина «е» через патрубок «ж» з'єднуватиметься із вузлом виведення гель-сфер промивача, а порожнина «д» з'єднуватиметься з генератором пневматичних імпульсів. Гвинт 6 служитиме для зміни амплітуд переміщень діафрагми пульсатора, а пружина 5 – для повернень діафрагми в початкові положення.

Генератор пневматичних імпульсів представляє собою посуд, що розділений гнучкою діафрагмою 1 на дві порожнини – «а» та «б», що з'єднані між собою трубопроводом. За подачі повітря у порожнину «а» тиск в порожнинах «а» та «б» зростатиме, але так, як порожнина «а» контактуватиме з атмосферою через вихлопну трубу "в", то і площа, на яку відбуватиметься тиск, буде більшою із боку порожнини «б», у результаті чого діафрагма 1 прогинатиметься в бік порожнини «а» та закритиме вихлопну трубу. Тиск в порожнинах «а» і «б» зростатиме до тих пір, доки не відкриється клапан 2, яким з'єднується порожнина «б» із атмосферою; тиск в порожнині «б» різко

падатиме, а діафрагма 1 під дією тиску у порожнині «а» прогинатиметься у бік порожнини «б», відкриваючи, при цьому, вихід повітря із порожнини «а» через вихлопну трубу у атмосферу.

Частоту відкривань клапану 2 (частоту пневматичної пульсації) можна змінювати при зміні витрати повітря, яке надходить у камеру «г».

Зі скиданням повітря тиск у порожнинах «а», «б» та камері «г» падатиме, а клапан 2 від дії пружини закриватиметься, а процес повторюється знову.

Порожнина «а» з'єднується з порожниною пульсатору «д». При збільшенні тиску у порожнинах «а» та «д» діафрагма прогинається у сторону порожнини «е», стискаючи пружину 5. Скидаючи тиск, діафрагма 4 внаслідок дії пружини 5, займатиме початкове положення.

Так як тиск у порожнинах «а» і «д» зростатиме повільно, то вихлоп траплятиметься за короткий проміжок часу і швидкість переміщень діафрагми 4 у прямому та зворотному напрямках буде різною, що забезпечуватиме різну швидкість руху у промиваючої рідини у змішувачу у прямому і зворотному напрямках.

#### **2.2.4 Випробувальна установка магніострикційного диспергування рідини (золю)**

Магніострикційний спосіб диспергувань рідини реалізується у лабораторній установці (рисунок 2.7, 2.8). У якості модельної рідини обрано дистильовану воду. Основним із вузлів установки є диспергуюча головка 1, що представлятиме собою циліндричну камеру, яка розділена перегородкою. У нижній частині камери встановлено фільтр 2 із мікроотвором з діаметром 160 мкм, а у бічній стінці передбачено штуцер 3 з метою подачі рідини. Верхню частину камери заповнено вазеліновим маслом, у котре занурено частину магніострикційного вібратора 4. Установку зібрано на лабораторному штативі і над диспергуючою головою 1 встановлено магніострикційний вібратор 4, що живиться з електронного генератора 5. Подача рідини у диспергуючу головку здійснюється із посудини 6, що забезпечена системою



пневмопідпірки 7. Струмień рідини витікатиме у посудину-збірник 8. Для спостережень процесу розпаду струменів на мікрокраплі в стробоскопічному світлі на штативі закріплено стробоскоп.

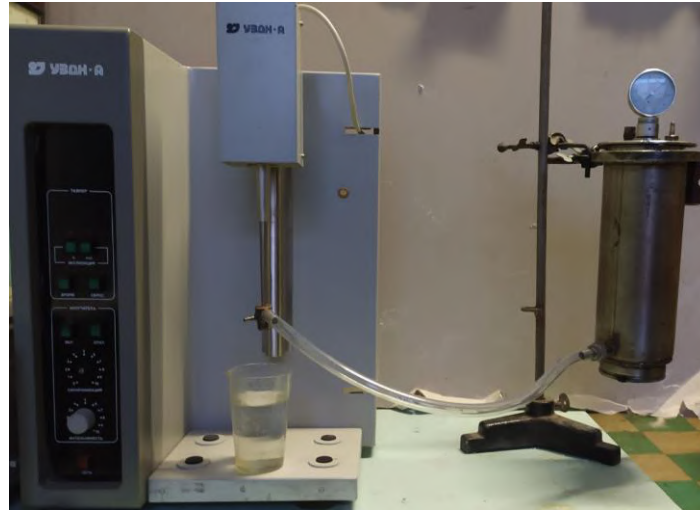


Рисунок 2.7 – Установки по дослідженню магнітострикційного способу диспергування рідини

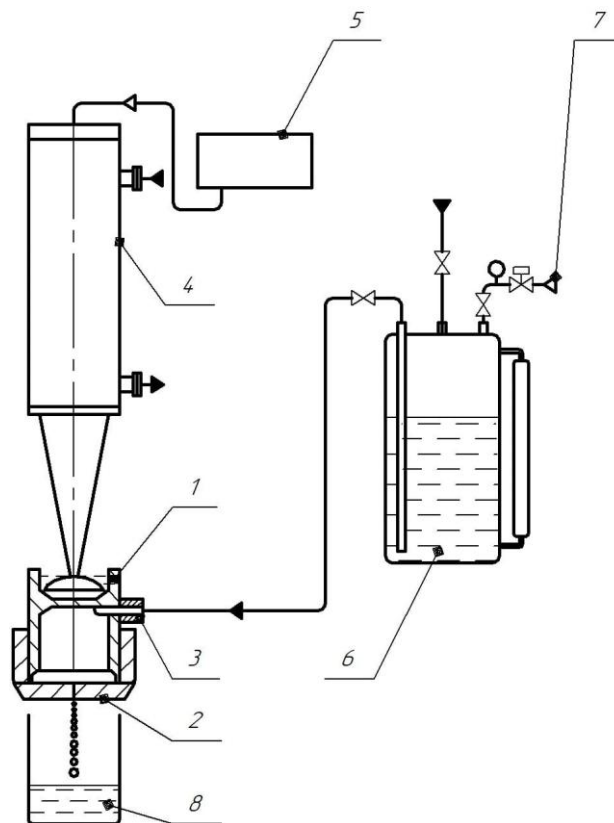


Рисунок 2.8 – Принципова схема установка з дослідження магнітострикційного способу диспергувань рідини

### 2.2.5 Лабораторна установка для дослідження теплофізичних особливостей процесу нанесення захисного піровуглецевого покриття на модель мікротвелу

З метою дослідження процесів нанесення захисних піровуглецевого покриттів на модель мікротвелу розроблено реактор із електротермічним псевдозрідженим шаром (ЕТПШ). Схему реактору зображено на рис. 2.9

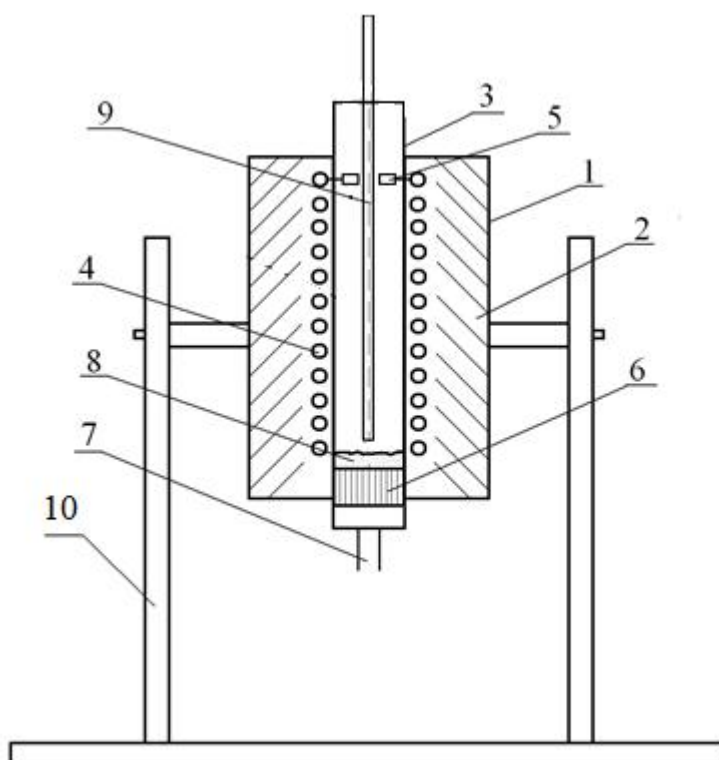
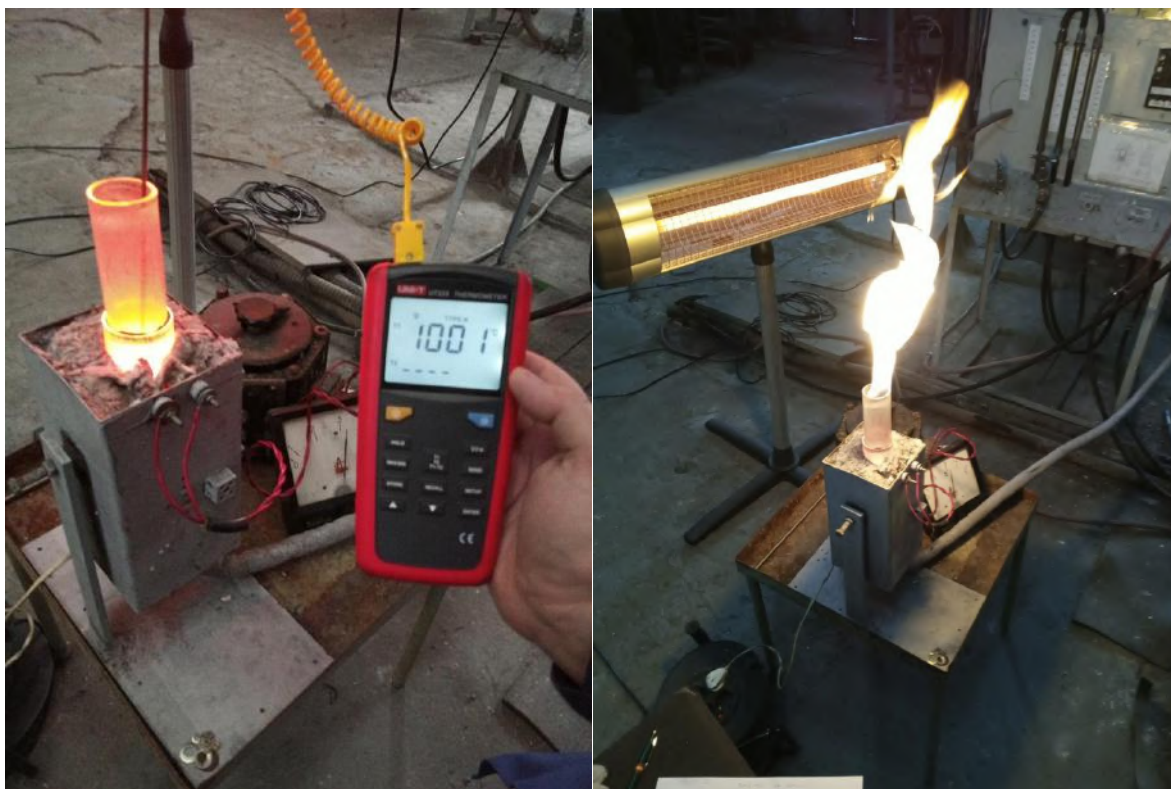


Рисунок 2.9 – Схема реактору із ЕТПШ для досліджень процесів нанесення захисних піровуглецевих покриттів: 1- зовнішній кожух, 2- теплоізоляція, 3- кварцева трубка, 4- нагрівач, 5- клеми нагрівача, 6- газорозподільна решітка, 7- штуцер підводу газів, 8- псевдозріджений шар із гранульованого  $Al_2O_3$ , 9- термопара, 10- підставка із рухомим механізмом.

Реактор складається із зовнішнього металічного кожуху 1, в якому розташовується шар теплоізоляції, виконаної із термостійкої вати МР-130, в середині якої є кварцева трубка 3. Навколо кварцевої трубки 3 розміщується нагрівач 4, що виконаний із нікелевої проволочки, що під'єднується з клемми

5. В нижній частині кварцевої трубки 3 розташовується газорозподільна решітка 6, куди знизу під'єднано 7 штуцер з подачі газу по створенню псевдозрідженого шару 8. У середині кварцевої трубки 3 буде знаходитися термопара 9. Уся конструкція знаходиться на рухомій підставці 10.

Загальний вигляд реактору наведено на рис. 2.10.



А

Б

Рисунок 2.10 – Загальний вигляд реактору із ЕТПШ для нанесення захисних піровуглецевих покриттів: а - за подачі чистого азоту, б - за подачі суміші природного газу і азоту.

Реактор працюватиме так: газопровідною трубкою 7 на газорозподільну решітку 8 подаватимуть суміш природного і інертного газу, що створює псевдозріджений шар 8 із зразків гранульованого  $Al_2O_3$ . Реакційна зона реактору нагрівається при пропусканні струму по нікель-хромовій обмотці (нагрівач) 4. Температура вимірюється термопарою 9. Вивантажується

оброблений матеріал в спеціальний термостійкий циліндр при перевертанні установки.

На рис. 2.11 приведено принципово-технологічну схему установки із реактором ЕТПШ по нанесенню захисного піровуглецевого покриття.

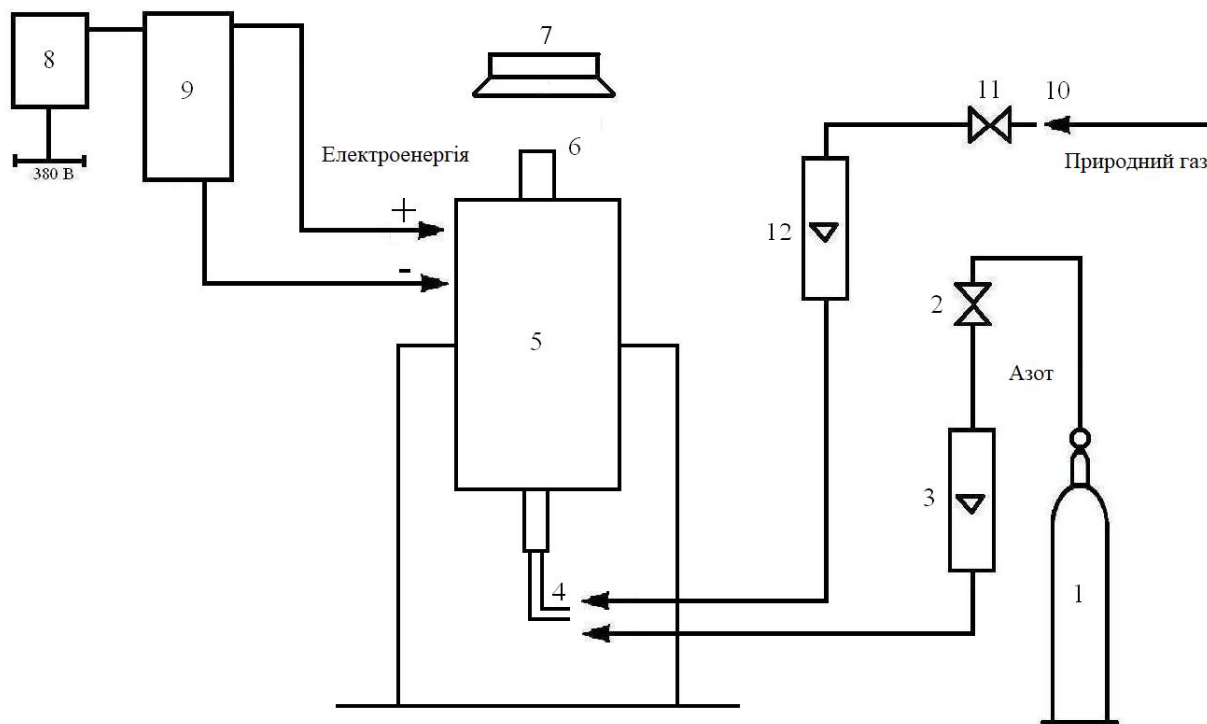


Рисунок 2.11 – Принципово-технологічна схему установки із реактором ЕТПШ з дослідження процесів нанесення захисних піровуглецевих покриттів: 1- балон із інертним газом, 2,11 вентилі, 3, 12- ротаметри, 4- штуцер підводу газів, 5- реактор ЕТПШ, 6 - верхня частина реактора, 7- витяжка, 8- вимикач, 9- ЛаТР (лабораторний трансформатор), 10- лінія магістрального природного газу.

Установка працює таким чином: при відкриванні редуктору на балоні 1 і вентилю 2 через ротаметр 3 з метою створення псевдозрідженого шару і інертної атмосфери подається інертний газ в реактор 5. Після проходжень реактору 5 по верхній частині реактору 6 азот виходитиме на витяжку 7. Ввімкнувши вимикач 8, за допомогою силового трансформатора 9 подається напруга на нагрівач реактора 5. Після виходу у температурний режим із

магістрального газопроводу 10 при відкриванні вентиля 11 через ротаметр 12 і газопровідну трубку 4 з метою проведення процесів піролізу у реакторі 5 подаються природний газ, при цьому, поступово заміщуючи інертний газ. Витрата природного і інертного газів вимірюються ротаметрами відповідно 12 та 3. У таблиці 2.2 приведені основні робочі параметри установки.

Таблиця 2.2 – Значення робочих параметрів лабораторної установки для нанесення захисного піровуглецевого покриття

Назва параметру	Одиниці вимірювання	Значення або діапазон вимірювання
Об'єм реакційної зони	м <sup>3</sup>	0,00008
Тип газорозподільного пристрою	-	безпровальна решітка
Тип електричного струму між електродами	-	змінний
Сила струму	А	2 ...3,8
Напруга	В	95 ...190
Температура процесу	К	1073 ...1273
Тривалість по обробці матеріалу	год	1
Витрата інертного газу	м <sup>3</sup> /год	0,005 (у суміші із природним газом) 0,05 (в момент розігріву реактору)
Витрата природного газу	м <sup>3</sup> /год	0,06 ...0,07

### 2.2.6 Експериментальна установка для дослідження режимів коливань краплі на різних частотах

У відповідності з поставленими задачами для досліджень режимів коливань крапель на різних частотах розроблено та виготовлено експериментальну установку, що представлена на рисунку 2.12. Стенд оснащено пневмосистемою вимірювання рівня рідини та пультом керування.

Система складається із перетворювача для пропорційних перетворень перепаду тиску в уніфіковані сигнали (система вимірювання рівня рідини у об'ємі). Рівень рідини регулюється рівнеміром. Контроль вібраційних сигналів від перфорованого кошику здійснюється за допомогою осцилографу. Зміна технологічних характеристик у процесі диспергування відбувається шляхом

вимірювань витрат та частоти із подальшою обробкою за рахунок програмного забезпечення Matlab.

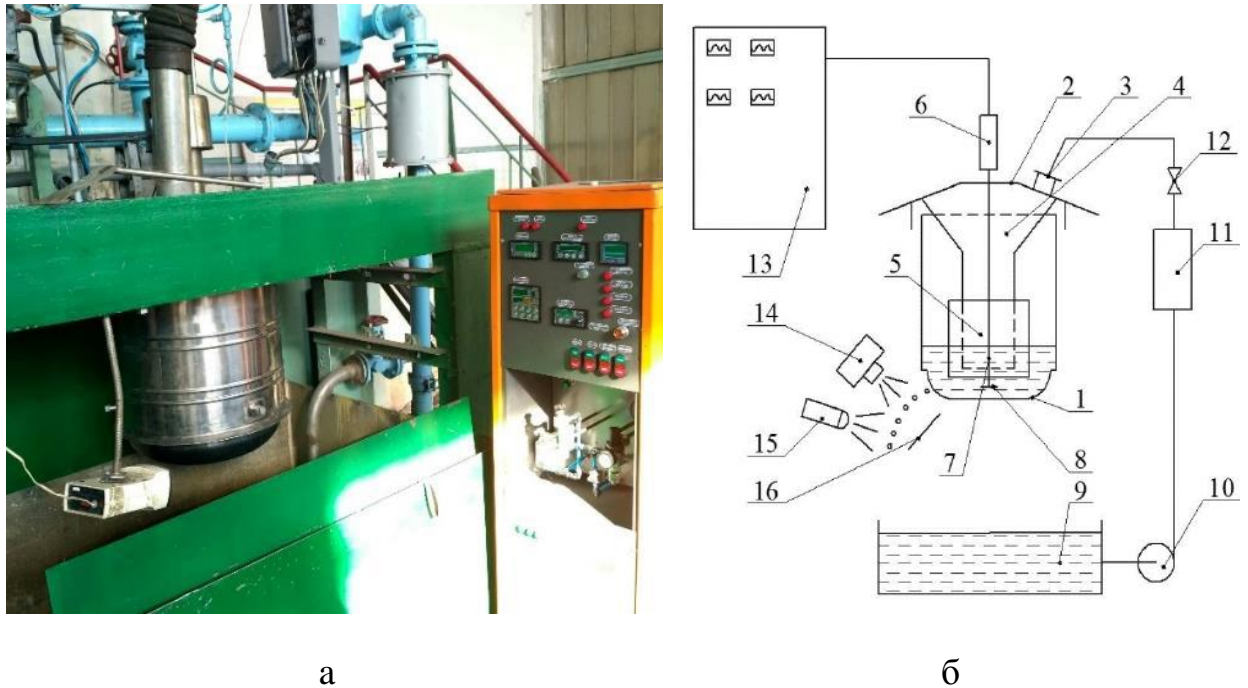


Рисунок 2.12 - Експериментальна установка (а) та схема обв'язки гранулятора (б):

1 - корзина; 2 - корпус; 3 - труба; 4 - колектор; 5 - фільтр; 6 - віброактуатор;  
7 - шток; 8 - резонатор; 9 - буферна ємність; 10 - насос; 11 - витратомір;  
12 - клапан; 13 - щит керування; 14 - відеокамера; 15 - стробоскоп; 16 - екран

Комп'ютерною програмою генерується сигнал із подальшим його посиленням та передачею на магнітострикційний актуатор, тобто електромагнітний вібратор, що викликає коливання резонатору, який знаходиться над центральною частиною перфорованого кошику.

При цьому, зазор між диском та дном забезпечує гідродинамічну взаємодію елементів гідромеханічної системи. Тому хвилі зв'язку поширюються у рідині і досягають перфорованого кошика.

Частота коливань днища має фіксуватися датчиком коливань «ДН-3М1» із перетворювачем «ПКВ-02». З метою візуальних спостережень за розпадом струменя рідини на краплі використовується стробоскоп.

Для експериментальних досліджень використовувалася вода. Вихідними умовами для проведення експериментів були дотримання частоти коливань, що варіювалася в діапазоні 200-800 Гц, та амплітуди 50 мкм для вивчення впливів накладених коливань на моди коливань крапель.

Отримані зображення проаналізовано методом Object Detection Method за рахунок програми Matlab.

## **2.3 Постановка задач числових моделювань, розробка розрахункової моделі**

### **2.3.1 Методика розрахунку термохімічних параметрів процесів піролізу**

Модель термодинамічної рівноваги широко використовується в науковій і виробничій практиці при вивченні поведінки складних за хімічним складом систем при підвищених температурах, коли істотну роль відіграють хімічні і (або) фазові перетворення. В хіміко-технологічних процесах, в металургії, екології основним завданням моделювання є визначення складу компонентів і фаз. У плазмохімії, енергетиці, теплотехніці потрібно, крім того, знаходження властивостей системи, таких як ентальпія, питома теплоємність, коефіцієнти переносу. Для реальних процесів, безсумнівно, допущення про фазовий і хімічний рівновазі є граничною оцінкою станів, але навіть така інформація відіграє неоціненну роль при аналізі маловивчених систем.

Перевагою термодинамічної методу є його універсальний характер, дозволяє досліджувати довільні за хімічним складом системи на підставі однієї лише довідкової інформації про термохімічних і термодинамічних властивості індивідуальних речовин – компонентів рівноваги. Ці властивості відомі для широкого спектра хімічних сполук, що знаходяться в газоподібному, конденсованому та іонізованому стані, в температурному діапазоні характерному для більшості інженерних додатків. Однак фізична прозорість моделі поєднується з обчислювальними труднощами

узагальненого алгоритму, труднощами підготовки вихідних даних та подання безлічі результатів.

В основу алгоритму цього багатоцільового програмного комплексу покладено універсальний термодинамічний метод визначення характеристик рівноваги довільних гетерогенних систем, заснований на фундаментальному принципі максимуму ентропії. Цей метод надає унікальну можливість узагальненого опису будь-якого високотемпературного стану за допомогою самих тільки фундаментальних законів термодинаміки, незалежно від умов та способів досягнення рівноваги; він вимагає мінімальної інформації про саму систему та її оточення [144, 145]. Програма пов'язана з великою базою даних властивостей індивідуальних речовин, що робить її придатною для дослідження довільних за хімічним складом композицій.

Основу інформації в базі даних складають термодинамічні, теплофізичні та термохімічні властивості індивідуальних речовин, які систематизовані в Інституті високих температур АН СРСР, Національному бюро стандартів США [145], багаторазово оприлюднені, а також опрацьовані та розраховані на основі молекулярних, калориметричних та спектроскопічних даних.

Найбільш часто методи рівноважної термодинаміки застосовуються в поєднанні з так званою ідеальною моделлю, відповідно до якої поведінка газової фази описується рівнянням стану ідеального газу, і все розчини є ідеальними [148].

Головними перевагами ідеальної моделі є її простота, універсальність і забезпеченість інформацією: якщо досліджується хімічно реагуюча гетерогенна система, то параметрами моделі є фактично тільки термодинамічні властивості індивідуальних речовин. У багатьох випадках ідеальна модель дозволяє цілком адекватно описати досліджуваний процес або явище.



### **2.3.2 Розробка розрахункової моделі вібраційного гранулятора (диспергатора)**

У відповідності з першим розділом диспергування рідини віброгранулятором протікає за накладання вимушених коливань на струмені рідини. Розплав (рис. 2.12) подається в патрубок входу плава 3, проходячи розподільник 6, що встановлений у циліндричному корпусі 4, потраплятиме до перфорованого днища 5, у якому проходитиме перемішування плаву при допомозі напірних лопатей 7, це забезпечує його рівномірність витікання із отворів. Від електродвигуна по зубчастій передачі передаватиметься [117] за допомогою вібровузла коливання із певною частою і амплітудою через плав по перфорованому днищу. Вібровузол являтиме собою актуатор, до якого під'єднано буде шток, по якому вібрації передаватимуться на диск, що розташований над центральною з частин перфорованого днища. Дослідження по передачі вимушених коливань через шари розплаву до днища є актуальною задачею [118].

Враховуючи складність опису передачі вібрації від диску через плав і до днища за рахунок аналітичних методів, з метою дослідження процесу використано числові методи, які реалізовані у програмному комплексі ANSYS Workbench, а конкретніше, - його модулях Fluent Flow, які базуються на методі скінченних об'ємів і Transient Structural, який базується на методі скінченних елементів та об'єднані System Coupling.

Першим з етапів числових розрахунків буде побудова тривимірної розрахункової моделі, яка включатиме спрощення з метою пришвидшення розрахунків, а також полегшення побудов розрахункової сітки і інтерпретації результатів [83-85]. З огляду на те, що задачею розрахунків було дослідження передач вібрації від вібропристроїв через плав аж до перфорованого днища, на першому з етапів розрахунків введено такі спрощення та допущення:

- шток, по якому передаватиметься вібрація з актуатору до диску випромінювача, є абсолютно жорстким, а, отже, можна і не вводити його у розрахункову геометрію і задавати граничну умову для диску;

- витікаючи, струмені води не впливатимуть на вібрацію перфорованого днища, а тому на першому з етапів розрахунку враховуватись вони не повинні;
- припускається, що як циліндричний корпус, так і перфороване днище є нерухожими.

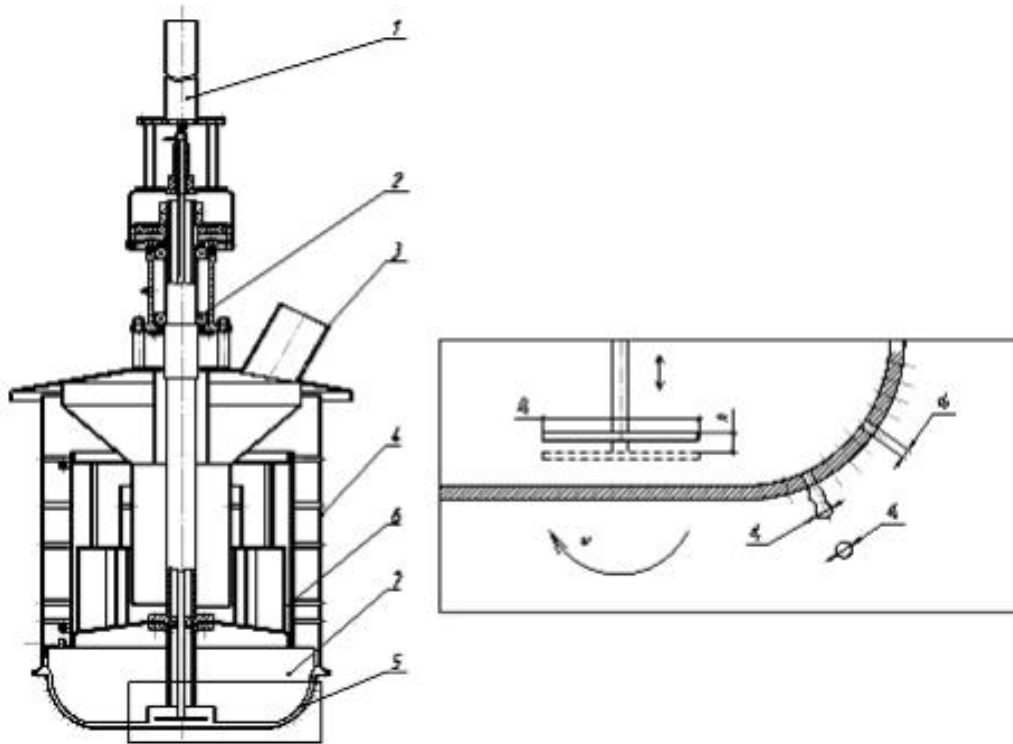


Рисунок 2.12 – Конструкція віброгранулятора:

- 1 – вібровузол; 2 – підшипниковий вузол; 3 – патрубок входу плаву;  
 4 – корпус; 5 – перфороване днище; 6 – розподільник; 7 – напірні лопаті

Отриману розрахункову геометрію показано на рисунку 2.13, де було її додатково розділено на зони для побудов структурованої розрахункової сітки, цим забезпечиться точність розрахунків. Розглянемо більш детально налаштування, що використані за побудови скінченно об'ємної розрахункової сітки модулю Fluent Flow. У зоні 1 використано метод, що є найоптимальнішим для тіл видавлювання Sweep, із наступним налаштуванням: Number of Division – 25; Element Order – Linear; Free Face Meshing Type - Quad. Цей метод використано і для зони 2 (Number of Division – 75; Element Order – Linear; Free Face Meshing Type - Quad). Для зон 3, 5, 6

використано метод Multi Zone, із налаштуваннями Hex Dominant, а це дозволяє будувати розрахункову сітку у переважності з гекса елементів (Element Order – Quadratic; Free Face Meshing Type - Quad). Для зони 4 використано глобальні налаштування в розрахунковій сітці, а саме: Element Order – Linear, Element Size – 5 мм, Capture Curvature – Yes, Curvature Min Size – 25 мкм, Curvature Normal Angle – 18°. Розрахункова сітка складається із 2,5 мільйонів елементів. При цьому, необхідно відміти те, що зону 5 виділено на висоті 300 мм з нижньої точки днища з метою задання у модулі Fluent Flow початкової поверхні розділу фаз.

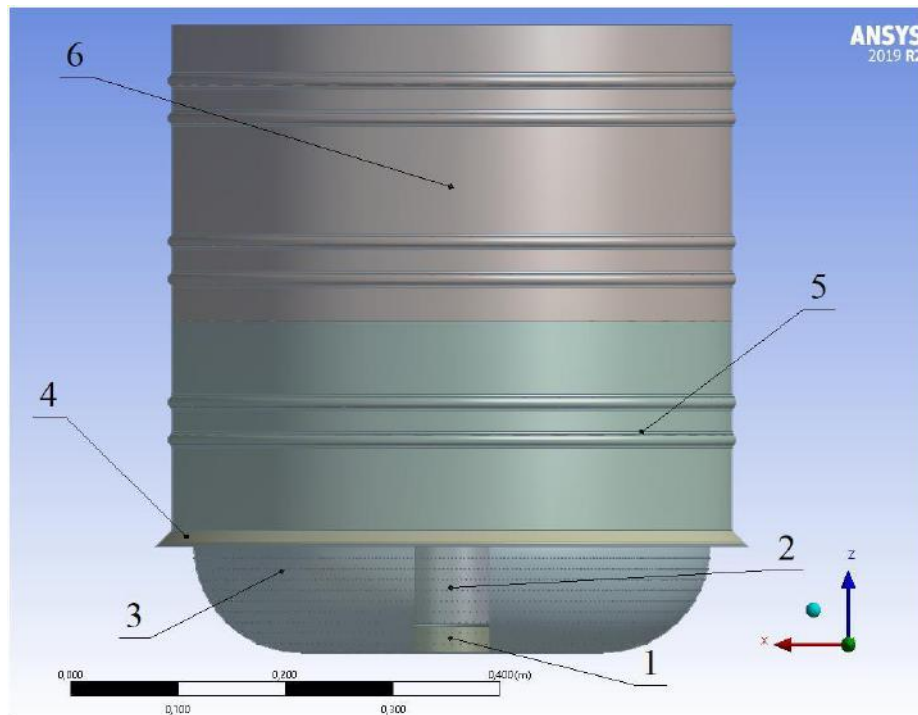


Рисунок 2.13 – Тривимірна розрахункова геометрія

Дана розрахункова сітка має 2,5 мільйони елементів і такі показники якості:

- мінімальна ортогональність 0,02 (за допустимого значення 0,001);
- максимальна скошеність 0,94 (за допустимого значення 0,95);
- коефіцієнт росту елементів 57.

Поперечний розріз в отриманій розрахунковій сітці показано на рисунку 2.14.

Побудувавши розрахункову сітку, наступним етапом визначалося налаштування поверхонь, що необхідні для завдань граничних умов і динамічної сітки [118...122]. Дані поверхні указані на рисунку 2.15.

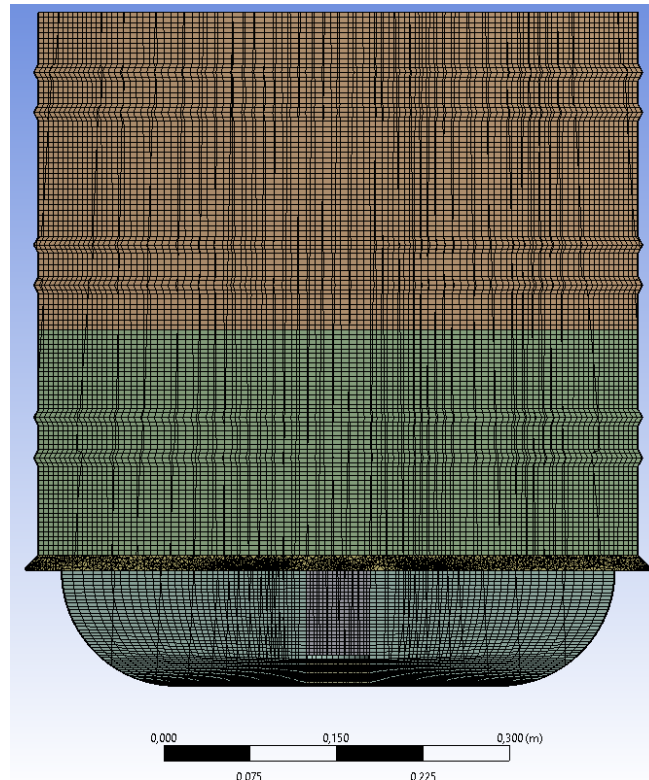


Рисунок 2.14 – Тривимірний скінченно об’ємний розрахунковий сітка (2,5 млн. розрахункових комірок)

Розглядаючи детальніше налаштування модулю Fluent Flow та враховуючи порядки величин переміщення, очікувані зі значень швидкості основної і другорядної фаз є близькими до нуля. Першочергово обрано тип аналізу – нестационарний і враховуємо необхідність врахування сили тяжіння, обравши напрямок вектору прискорень вільного падіння, що є протилежним до додатного напрямку осі OZ. Наступним буде вибір моделі багатофазних потоків – Volume of Fluid, яку рекомендовано для випадків, коли характеризуються чіткими розмежуваннями між об’ємами двох фаз. Вода є головною фазою, а другорядною фазою – повітря. Для даної моделі обрано такі опції: тип моделювання поверхні розділу фаз – Sharp (різкий), який застосовувався в випадку вільної поверхні рідин; формулювання – Explicit

(явний), це використовує для вирахування форми поверхні в розділі фаз послідовно-лінійної побудови інтерфейсу; також активовано налаштування Implicit Body Force Formulation з метою врахування сил (діючих об'ємних), це дозволить покращувати збіжність задач за рахунок часткової рівноваги градієнтів тиску та об'ємних сил і рівняння імпульсу. Ще одним з важливих налаштувань було Volume Fraction Cutoff =  $1 \cdot 10^{-6}$  і Courant Number = 0.25. Звичайно, що ще додатково було задано умови взаємодії фаз (моделювання сил з поверхневого натягу по гранці розділу повітря/вода із коефіцієнтом 0.075 н/м). У якості моделі течії рідини обрано ламінарну модель.

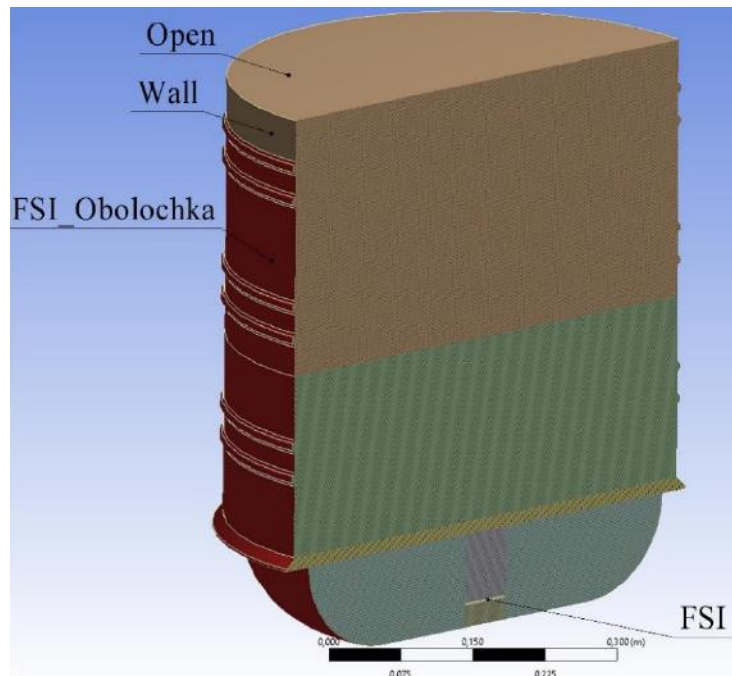


Рисунок 2.15 – Граничні умови

Поверхні для задання граничних умов системи передбачають, що усі поверхні FSI, wall, FSI\_Obolochka, open були обрано як стінки із умовою No Slip, а це значить, що швидкість рідини на усіх стінках дорівнюватиме швидкості руху стінки. У якості робочих умов обраний тиск, що є рівним атмосферному і задана «робоча густина» (як густина повітря). Це налаштування виключатиме зростання гідростатичного тиску у фазі із

найменшою густиною, покращуючи, при цьому, точність округлення балансу імпульсів.

Одним із найважливіших етапів у розрахунку зв'язаних задач є налаштування динамічної сітки. У модулі Fluent доступні і такі методи: Smoothing, Layering, Remeshing. Для того, аби визначити який з методів буде необхідним в даному випадку, було звернуто увагу на такі параметри, як характерні розміри елементів в побудованій розрахунковій сітки (при цьому, мінімальна довжина граней елементу 15 мкм, максимальна довжина граней елементу 6,1 мм), розташування найменших елементів (усі вони знаходяться у зоні 4 рисунок 2.13), максимальні переміщення диску випромінювача (50 мкм). Так як, максимальні переміщення диску у випромінювача менші, ніж мінімальні розміри елементів у зонах 1 і 2 (рисунок 2.13) для перебудов розрахункової сітки без появ елементів у нульового об'єму достатнім буде використання методу динамічних сіток Smoothing, а його використання являється менш затратним, порівнюючи з іншими методами, так як число вузлів і зв'язки між ними є незмінними. У якості додаткового параметру обрано Spring Contact Factor, яким дозволяється забезпечити, за необхідності, збереження положень вузлів, що знаходяться поблизу стінки. Цей параметр може змінюватись у межах 0 - 1, у даному випадку задавався рівним 0,1. Number of Iterations = 100 – кількість ітерацій, за яку Fluent мав стиснути/розтягнути елементи. Після вибору методів перебудови сітки була необхідність задавання типу руху границь і сіткових зон, що показані на рисунку 2.16. Серед них, для поверхонь wall, open було задано тип Stationary, а це означає передписання гранць, або у цілому сітковій зоні властивостей абсолютно твердого тіла, а, отже, границя чи область не деформуватимуться. Такий вибір поясниться тим, що рух рідини у середині корпусу гранулятора не матиме впливу на них. Тип Deforming був заданий для внутрішньої області гранулятора, аби забезпечити перебудову сітки у об'ємі рідини, яка знаходиться у середині гранулятора. У опціях для такого типу обралося налаштування, яке вказує на необхідність по використанню глобальних

налаштувань динамічної сітки з метою її перебудови у даній області. В випадку поверхонь FSI, FSI\_Obolochka було обрано тип System Coupling, що використовується в випадку сполучень двох модулів.

Наступним з етапів являлося налаштування вирішувача. Першочергово обирався чисельний алгоритм зв'язків тиску і швидкості, який використовує комбінацію рівнянь по нерозривності і імпульсам та виводу рівнянь тиску. У даному випадку обрався метод Coupled, не зважаючи на те, що він являвся більш обчислювально затратним, порівнюючи з іншими, при цьому, але і більш точним. Наступним з кроків був вибір методу просторової дискретизації, в даному випадку, – PRESTO! У зв'язку із тим, що на границях розділу фаз відбуваються стрибки тиску; для градієнтів – Least-Squares Cell-Based рекомендований у неструктурованих сітках та є найменш обчислювально затратним в порівнянні з іншими схемами. Second Order Upwind є схемою уже другого порядку точності, а для об'ємної долі – Geo-Reconstruct має обиратися автоматично у момент вибору формулювань – Explicit, для часу – First Order Upwind.

Після налаштувань вирішувача слід провести ініціалізацію задач і заповнити зону 1 – 5 рідиною, де було використано інструмент Patch Interface та Refinement Criterion, це дозволяє обрати розмір регіону заповненого водою, уточнивши у ньому сітку (зменшивши розміри комірки). Максимальний рівень уточнень (Maximum Refinement Level) задавався рівним 2, а розміри регіону задавалися такими, які б відповідали заповненню корзини 300 мм від днища. Отриману розрахункову сітку після використання вище вказаної функції показано на рисунку 2.16.

Потім налаштовувався Patch Interface (оновлення регіону), де у якості фази заповнювався регіон з водою. Серед додаткових налаштувань обрано Volumetric Smoothing і задано Smoothing Relaxation Factor, що рівний 0,25, це дозволяє забезпечити чіткість у поверхні розділу фаз [123-125].

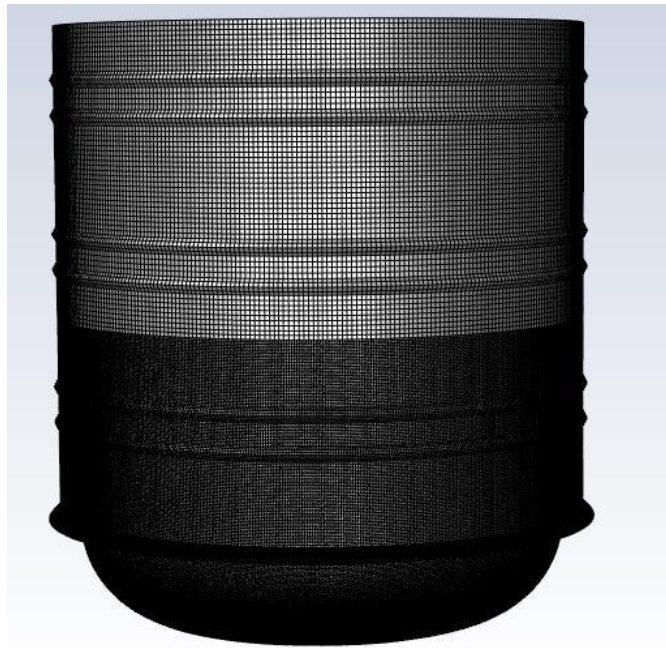


Рисунок 2.16 – Розрахункова сітка із виділеною областю для рідини

Останнім кроком у налаштуваннях розрахунку у модулі Fluent Flow являлося завдання максимальної кількості ітерацій на 1 часовий крок. Для забезпечення у точності вирішень було задано 30 ітерацій.

Після налаштувань модулю Fluent Flow здійснилося налаштування модулю Transient Structural, що починалося із вибору матеріалу у кожного елемента конструкції, у даному випадку обралася сталь. Потім відбувалася побудова скінченно елементної розрахункової сітки з використанням лінійних елементів, які являються менш обчислювально затратними і мають достатню точність.

Побудувавши скінченну елементну розрахункову сітку, задавалися граничні умови на поверхні, які показані на рисунку 2.17. З робочих умов було відомо, що диск випромінювача коливався із частотою  $\omega = 360$  Гц і амплітудою  $A = 50$  мкм, а, отже, його рівняння руху мало вигляд:

$$x = A \cdot \sin \omega t \quad (2.23)$$



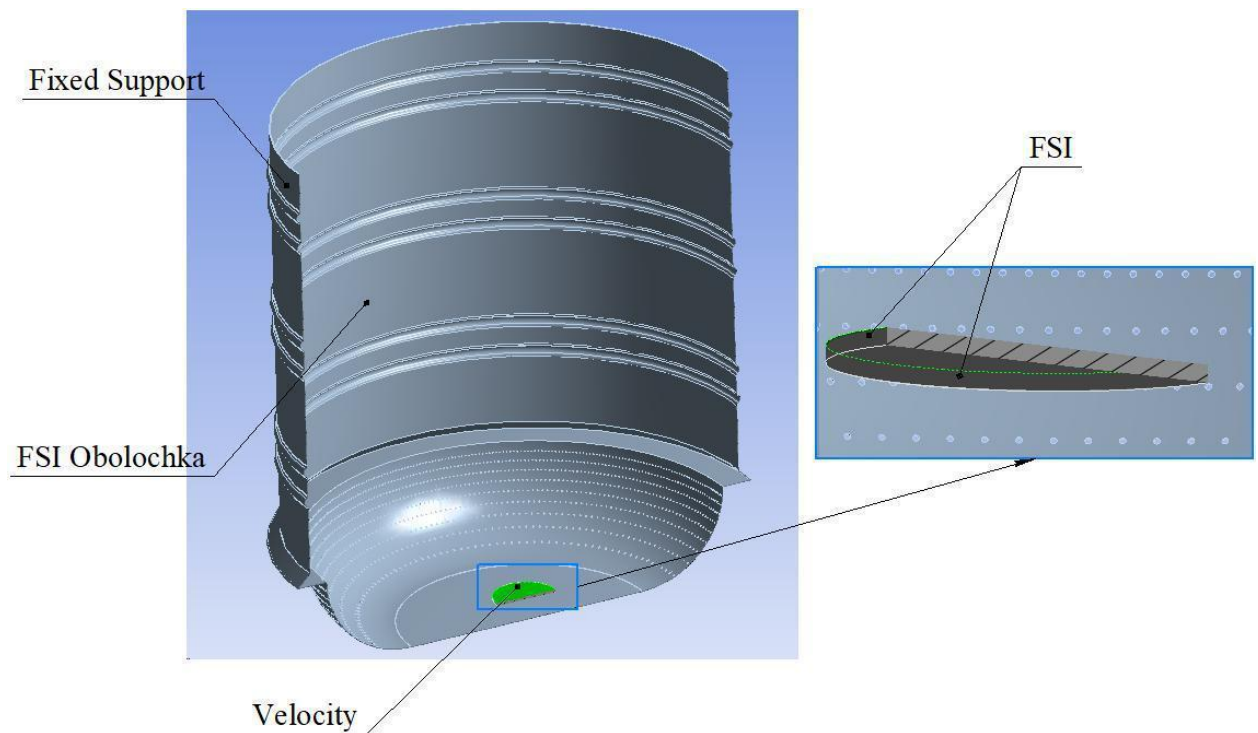


Рисунок 2.17 – Поверхні завдання граничних умов з метою розрахунку в модулі Transient Structural

Враховуючи необхідність у вирішенні пов'язаної задачі завдання, одразу ж рівняння руху не представлялося можливим. Тому, наступним рівнянням задавалася віброшвидкість на поверхні Velocity (рисунок 2.17):

$$V = A \cdot \omega \cdot \cos \omega t \quad (2.24)$$

Фінальним з етапів було налаштування модулю System Coupling, у якому першочергово налаштовувався часовий крок, який буде використовуватися для обох модулів. Його було обчислено із точки зору забезпечення десяти підкроків за один період коливань ( $T = 0,0027$  с), а, отже,  $0,00027$  с.

Згодом, налаштовувалася передача даних між обраними до цього ще поверхнями у обох модулях, а саме із FSI\_Obolochka (Fluent) на FSI\_Obolochka (Transient Structural) передавалася сила, із якої рідина діяла на поверхню. Це означало, що розрахунок у Fluent являвся джерелом для модулю Transient

Structural. Що до пари поверхонь FSI, то модуль Transient Structural служив джерелом у переміщенню для границі у Fluent.

#### **2.4 Вибір та порівняльна оцінка методів досліджень. Оцінка похибок вимірювань та адекватності результатів моделювань**

Для обробки отриманих результатів застосовувався загальноприйнятий підхід по оцінюванню сумарної похибки з проведення експериментальних досліджень [126...128], зокрема, для відносної похибки вимірюваних величин визначався за виразом:

$$\delta_y = \sqrt{(\delta_{y1} + \delta_{y2})^2 + \delta_{y3}}, \quad (2.25)$$

де  $\delta_{y1}$ ,  $\delta_{y2}$ ,  $\delta_{y3}$  – відносні похибки вимірювального приладу, методу вимірювання та випадкова похибка відповідно.

Похибка вимірювального приладу визначалася, як правило, з половини ціни ділення. Похибка методів вимірювання урахувала недосконалість методу досліджень. Випадкова похибка відповідала за точність повторних вимірювань та залежала від сукупності випадкових факторів. Абсолютне її значення було нормалізованим середньоквадратичним відхиленням у результатах багаторазових вимірювань:

$$\delta_{y3} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (y_k - y_{av})^2}{n-1}}, \quad (2.26)$$

де  $y_k$  – значення вимірюваної величини в  $k$ -му вимірюванні ( $k = 1, 2, \dots, n$ );  
 $n$  – кількість повторів у вимірюваннях величини;  
 $y_{av}$  – середнє значення вимірюваної величини у серії  $n$  повторюваних вимірювань:

$$y_{av} = \frac{\sum_{k=1}^n y_k}{n} \quad (2.27)$$

З метою визначення відносної похибки  $\delta$  в розрахунку комплексної величини  $y$ , що функціонально залежала від сукупності вимірюваних величин  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) із загальною кількістю  $m$  застосовано наступну формулу:

$$\delta_y = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\psi \delta_{x_i})^2} \quad (2.28)$$

де  $\delta_{x_i}$  – відносна похибка вимірювань величини  $x_i$ ;  $\psi_i$  – вагові функції:

$$\psi_i(x_1, x_2, \dots, x_m) = \frac{x_i}{y} \frac{\partial y}{\partial x_i}. \quad (2.29)$$

З метою перевірки відповідності теорії із експериментальними даними застосовано порівняння двох незалежних похибок по критерію Фішера:

$$F = \frac{D_1}{D_2}, \quad (2.30)$$

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

$$D_1 = \frac{1}{p-l} \sum_{j=1}^p (y_j - y_j^{av})^2; D_2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i^e - y_{av})^2, \quad (2.31)$$

де  $p$  – кількість груп параметрів;

$l$  – кількість параметрів теоретичної залежності;

$n$  – кількість експериментальних точок;

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

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

## 2.5 Висновки до другого розділу

1. Розроблена дискретна математична модель для побудови амплітудно-частотної характеристики днища гранулятора. Дана модель представлена тривимірною скінчено-об'ємною розрахункова сітка розрахункової області у вигляді 2,5 млн. розрахункових комірок та враховує інерційні, жорсткісні демпфіруючі властивості функціональних елементів.

2. Представлена методика визначення невідомих характеристик моделі за результатами числового моделювання, а саме коефіцієнту затухання демпфованих коливань, враховуючи введені спрощення та припущення: шток, через який передається вібрація від актуатора до диску випромінювача абсолютно жорсткий; витікаючі струмені води не впливають на вібрації перфорованого днища, тому не враховуються; припускається, що корпус та перфороване днище нерухомі.

3. Наведена методика проведення фізичних експериментів процесу диспергування рідини (золю), яка дозволяє оцінити вплив гідродинамічних показників та конструктивних параметрів обладнання на фізико-механічні властивості отримуваних гранул каталізатора  $Al_2O_3$ . З метою підтвердження результатів експериментальних досліджень проведена оцінка похибок вимірювань та адекватності результатів моделювань.

4. Розроблена експериментальна установка для отримання каталізатору  $Al_2O_3$  та запропонована конструкція пульсаційного змішувача промивача гель-сфер.

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

6. Розроблені експериментальні установки та відповідні методики проведення експериментальних досліджень впливу таких факторів як нахил

отвору, нерівномірність подачі рідини та циркуляція перед отвором на витрату рідини через отвір.

## 3 УЗАГАЛЬНЕННЯ І ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Теоретичні моделювання процесу вібраційної грануляції дисперсних матеріалів за золь-гельною технологією

Розрахунок розпочинається з оцінки деформацій, які викликаються коливаннями диску випромінювача, що зображено на рисунку 3.1.

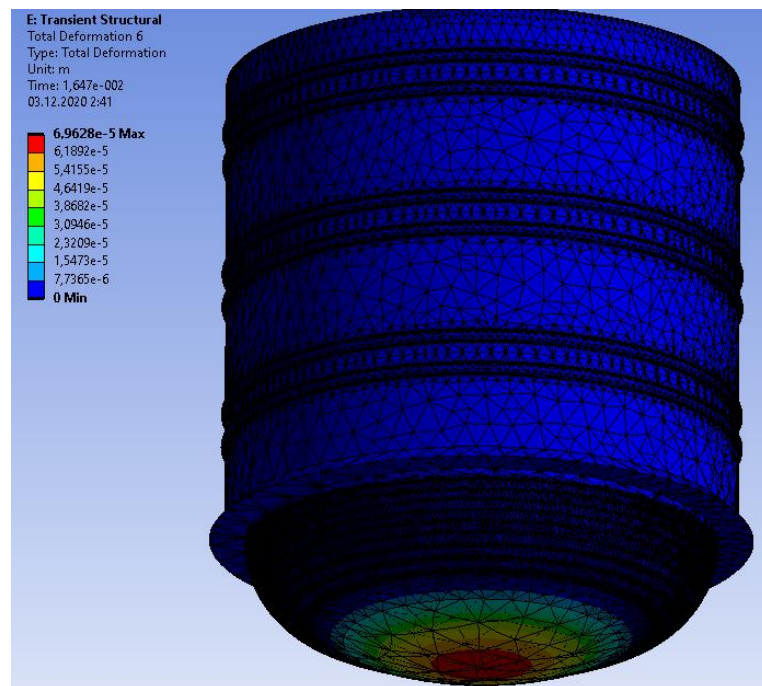


Рисунок 3.1 – Максимальні деформації корпусу гранулятора

Встановлено, що найбільші деформації корпусу матимуть місце під диском, складаючи 70 мкм. Тому вводиться термін ефективної площі диска, що складає 24 %. З метою отримання більш конкретного розуміння про дію диска випромінювача слід розглянути структуру потоку, вектори швидкості, що наводяться на рисунку 3.2 в моменти часу, які відповідають нижньому положенню диска. З рисунку 3.2 встановлено, що під час руху диска утворюються завихрення потоку, а це означає, що створюючи математичну модель руху рідини дані завихрення необхідно враховувати.

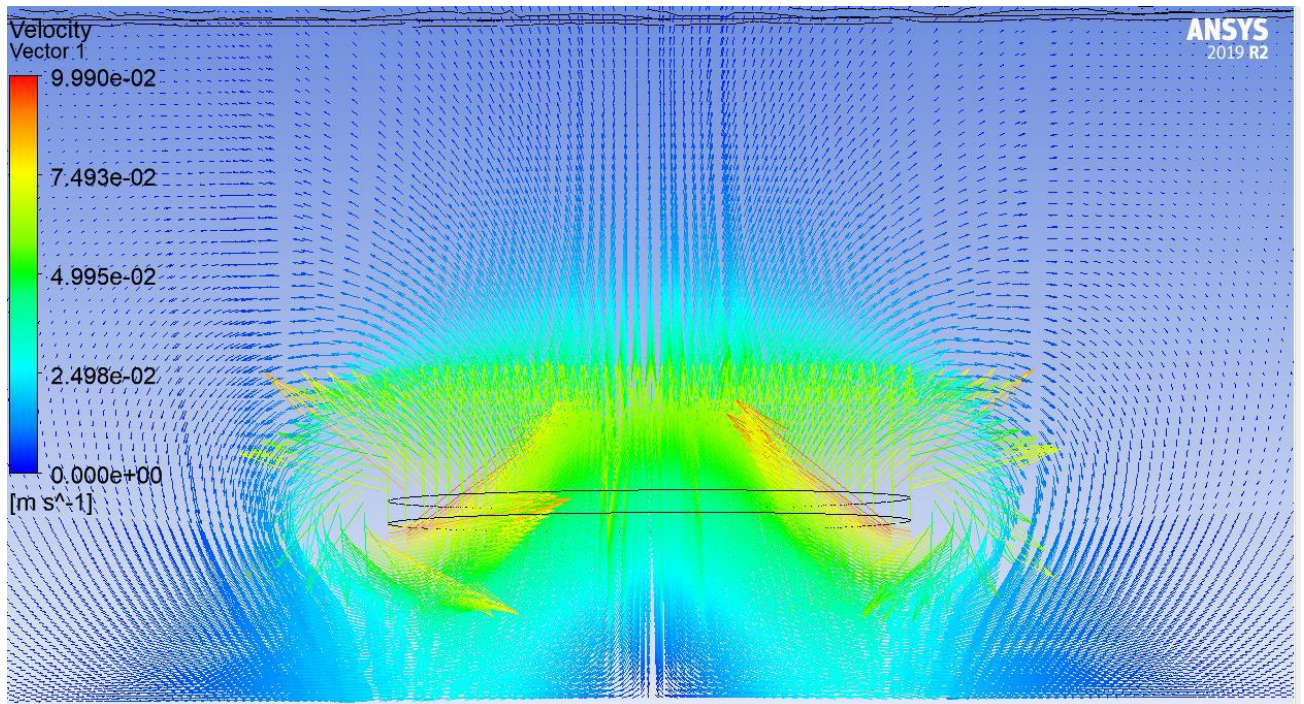


Рисунок 3.2 – Векторне поле швидкостей рідини при крайньому нижньому положенні диску

Вказана на рисунку 3.3 траекторія руху частини днища являє собою косинусоїду. Тому з метою визначення амплітуди і частоти коливань використано швидке перетворення Фур'є, розклавши коливання на елементарні складові. Дослідження по оптимальній формі кошику гранулятора висвітлено в роботі [139].

Застосовуючи MathCAD, в що імпортувалася матриця максимальних переміщень перфорованого днища, використано 64 точки із частотою виводу точок  $3704 \text{ c}^{-1}$ , а набір даних показано на рисунку 3.4, результати - на рисунку 2.10 б.

Переміщення, м

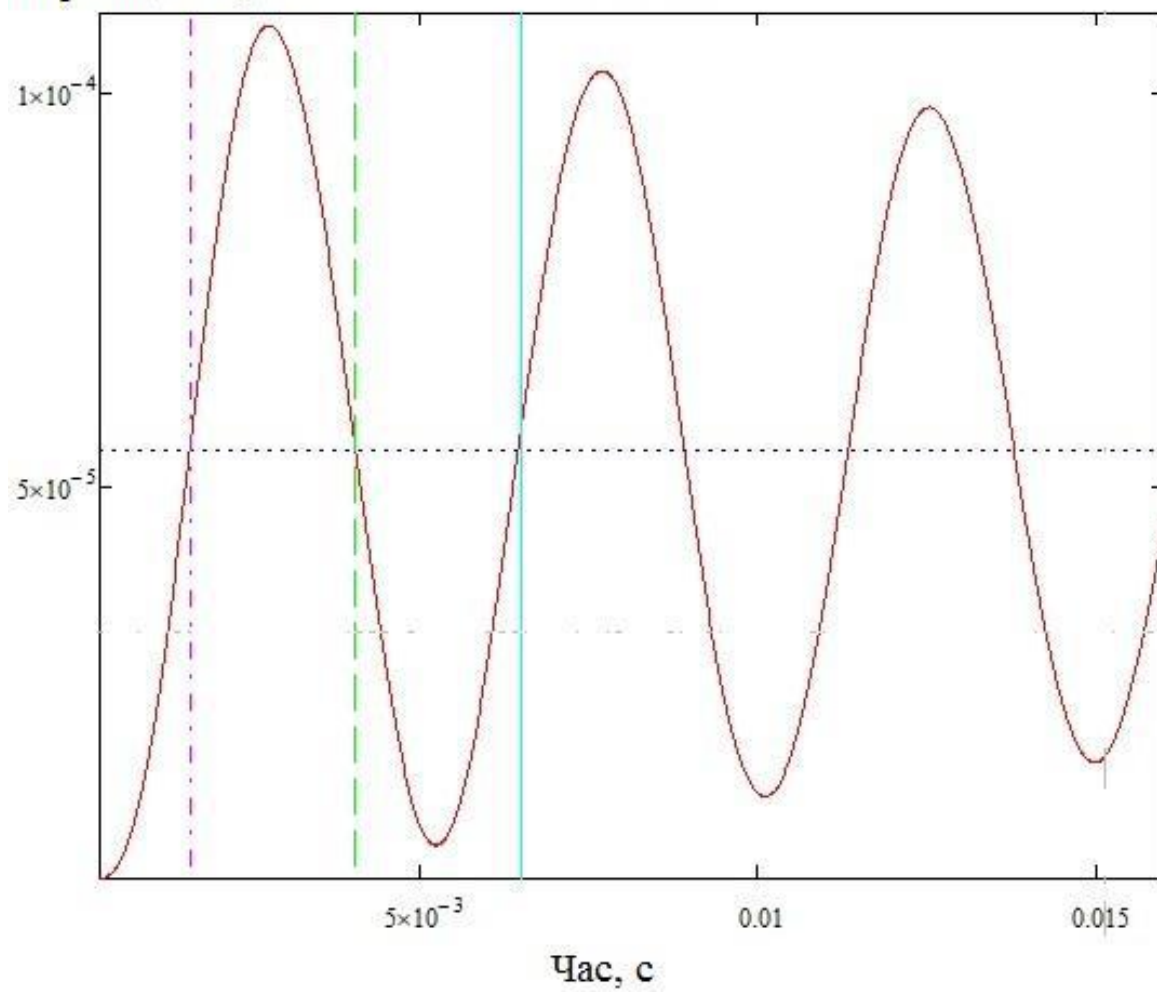
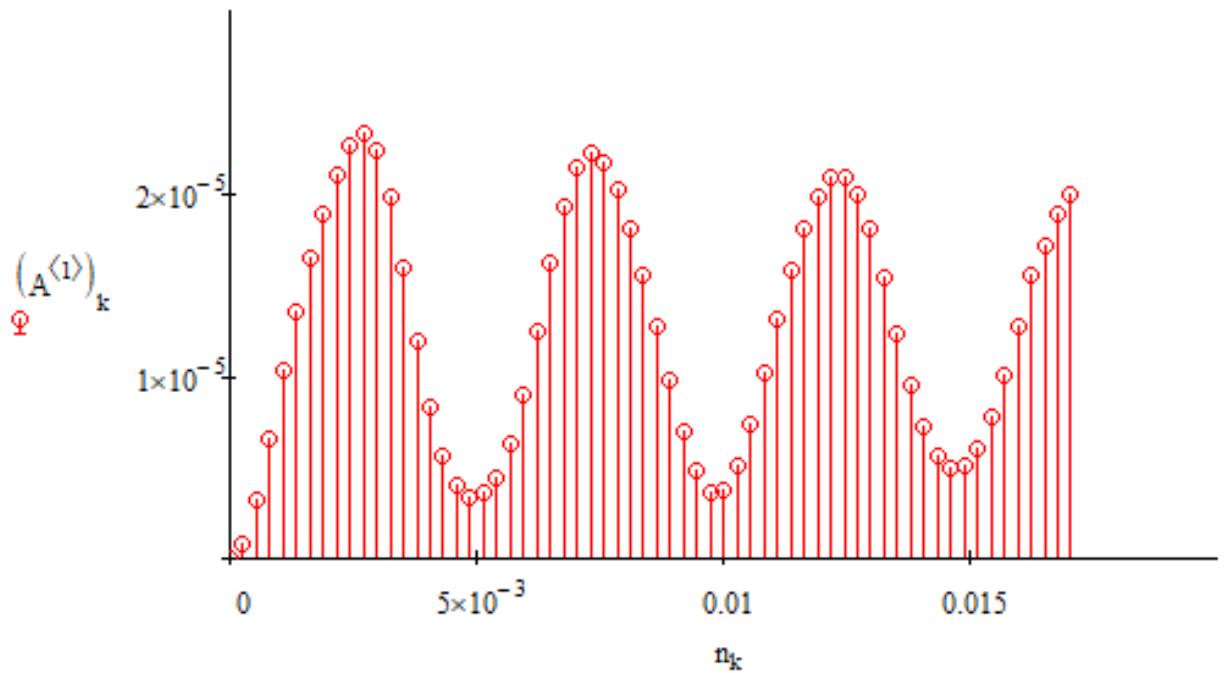
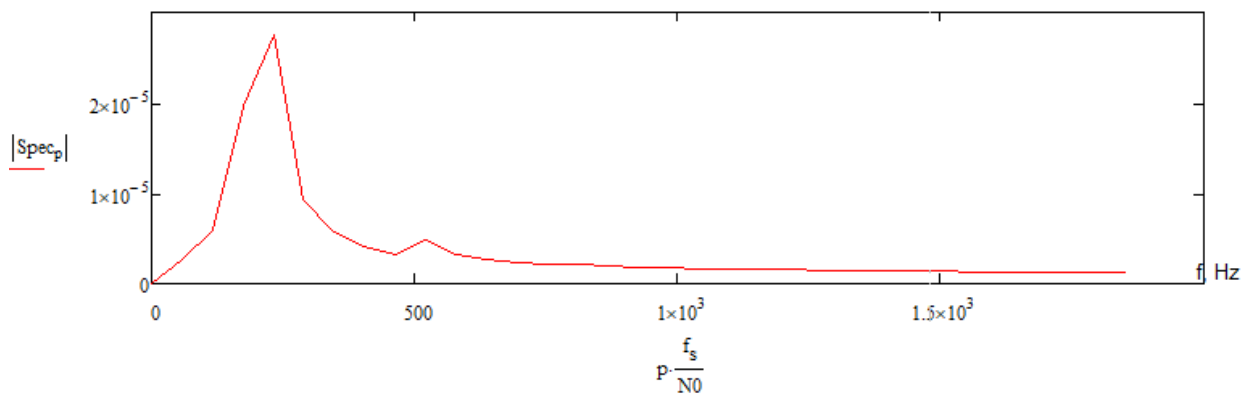


Рисунок 3.3 – Траєкторія руху ефективної частини днища





a)



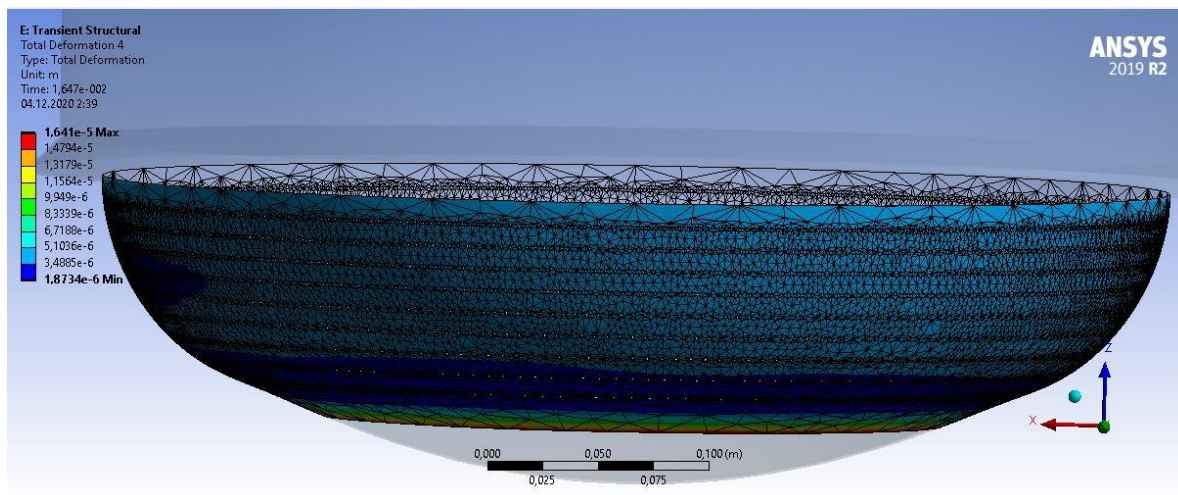
б)

Рисунок 3.4 – Вихідні дані для перетворення Фур'є (а), результат перетворення (б)

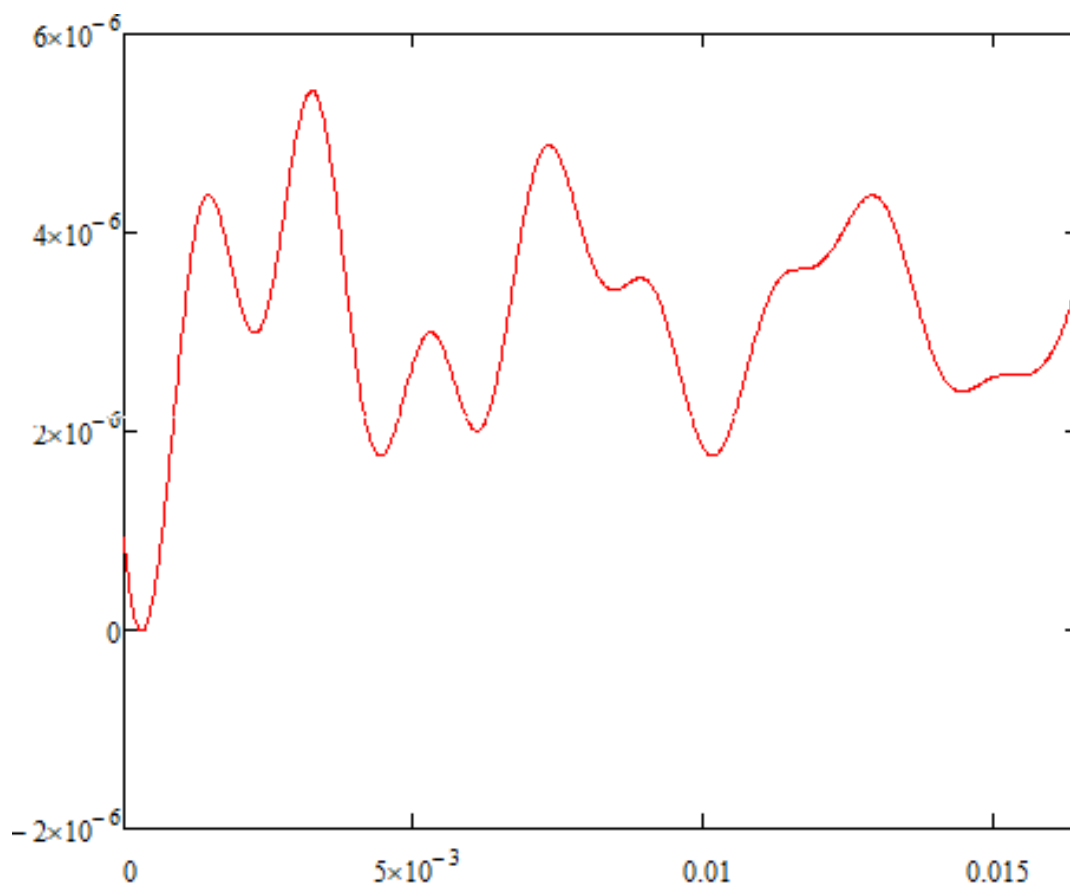
В результаті перетворень визначено, що представлені коливання складаються із двох гармонічних, які мають такі частоти і амплітуди. При цьому:

- 1) головною з них є 231 Гц з амплітудою 27 мкм;
- 2) другою частотою є 520 Гц і амплітудою 4,8 мкм.

З огляду на отримані результати рисунків 3.5 а з деформаціями та рисунку 3.5 б з траєкторією їх руху, проведено швидке перетворення Фур'є з метою отримання гармонічних складових коливань перфорованої частини днища.



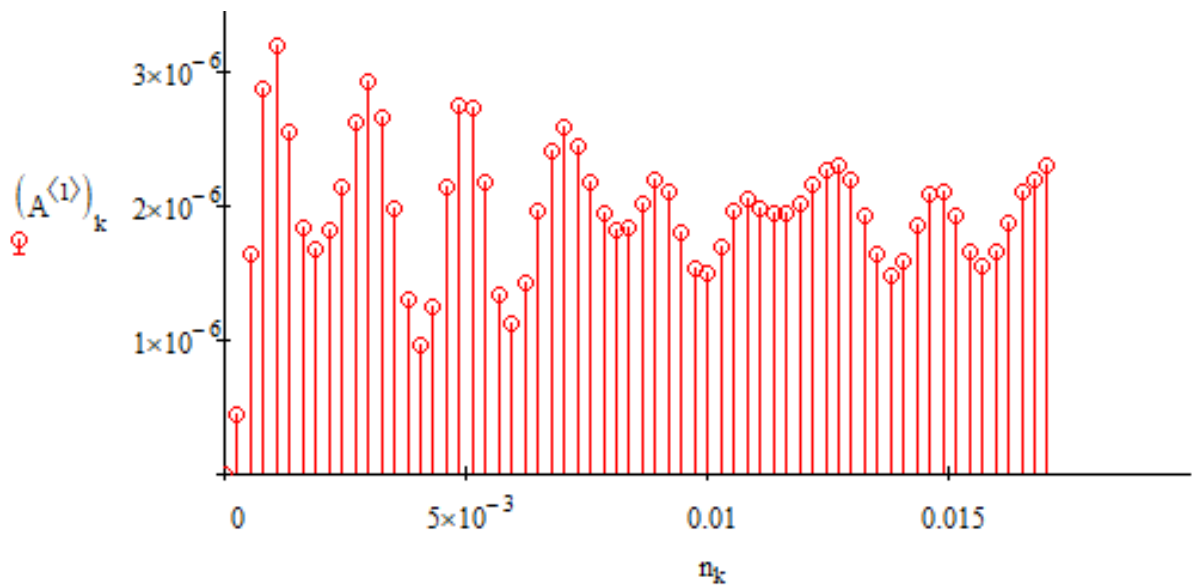
a)



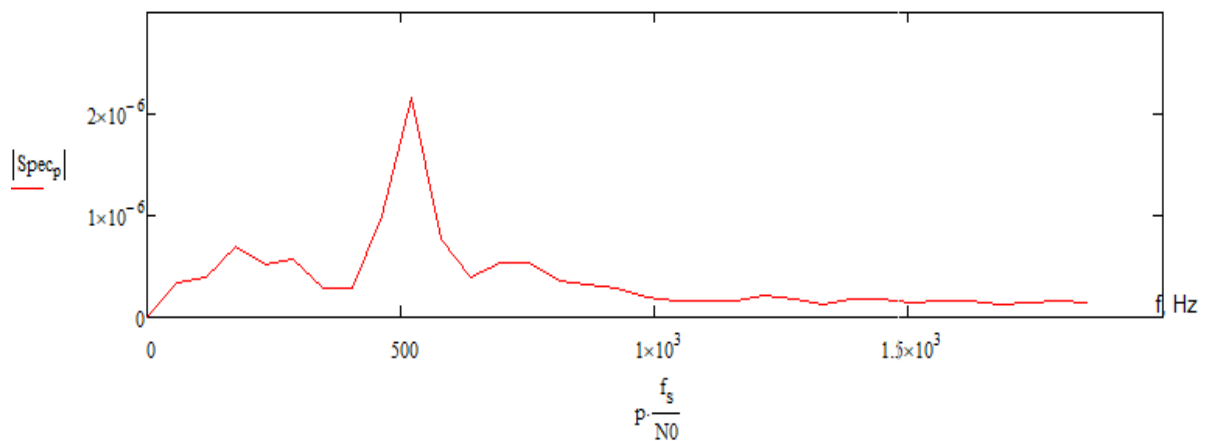
б)

Рисунок 3.5 – Переміщення перфорованої частини днища (а), залежність його деформацій від часу (б)

В результаті перетворень визначено, що головною частотою є 520 Гц з амплітудою 2 мкм.



а)



б)

Рисунок 3.6 – Вихідні дані для перетворення Фур'є (а), результат перетворення (б)

Таким чином, коливання нижньої частини днища складається із двох гармонічних коливань 230 Гц і 520 Гц.

### 3.1.1 Математична модель демпфованих коливань

З метою попереднього оцінювання характеристики коливань днища використовується традиційна дискретна математична модель, що враховує інерційні, жорсткісні і демпфуючі властивості функціональних елементів (рис. 3.7):

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F(t), \quad (3.1)$$

де  $F(t)$  – зовнішня сила;  $m$  – еквівалентна маса;

$c$  – коефіцієнт і жорсткості;

$b$  – коефіцієнт демпфування, який підлягає оцінюванню по даним чисельного експерименту.

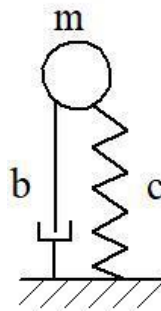


Рисунок 3.7 – Розрахункова схема

Частота коливань «ефективної площі» перфорованого днища складає 231 Гц, а це відповідає частоті вільних не демпфованих коливань 205 Гц. Отже, коефіцієнт загасання визначається за формулою:

$$n = \sqrt{\omega_0^2 - \omega^2}; \quad (3.2)$$

де  $\omega_0$  – частота вільних не депфованих коливань.

Розрахований за даною формулою коефіцієнт загасання складає 107 Гц.

В результаті розрахунків, представлених в розділі 2.4 звіту за перший етап отримано:

$$-\omega^2 A e^{i\omega t} + 2ni\omega A e^{i\omega t} + \omega_0^2 A e^{i\omega t} = a_0 e^{i\omega t}; \quad (3.3)$$

а після тотожних перетворень визначено амплітуду коливань днища:

$$A = \frac{a_0}{|\omega_0^2 - \omega^2 + 2ni\omega|} = |A| e^{i\varphi}, \quad (3.4)$$

де залежності при визначенні амплітуди та фази коливань днища матимуть вигляд:

$$\begin{cases} |A| = \frac{a_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2n\omega)^2}}; \\ \varphi = \operatorname{arg} \left( \frac{2n\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \end{cases} \quad (3.5)$$

### **3.1.2 Математичне моделювання гідромеханічних процесів в момент руху краплин золю від диспергатору до контакту із розчином аміаку**

Досягнення високих значень питомої поверхні гранул та загального обсягу пор можливе за рахунок інтенсифікації масообмінного процесу шляхом створення розвинутої міжфазної поверхні в момент диспергування рідини (золю), а також осідання дисперсних часток в вільному газовому просторі і подальшого осідання з затвердінням.

Представлено вплив потоку газу на рідку краплю. Для розробки математичної моделі можна використати як полярну систему координат з джерелом у точці О, так і сферичну систему координат із джерелом мас-центру (рисунок 3.8).

В момент моделювання обрано наступні спрощені припущення. Першим із них є те, що рідка крапелька відносно невелика. Це дає змогу розглядати сферичну форму краплі і не розглядати вторинний розпад. Відстані між

крапельками значно перевищують діаметр. Це дає можливість нехтування як взаємним впливом крапель, так і їхнім згортанням. Нарешті, крапля рухається перекладно. Запропоновано математичну модель для вивчення розподілу окружної швидкості радіусом крапельки та визначення швидкості мас-центру та кутової швидкості її обертання у газовому потоці.

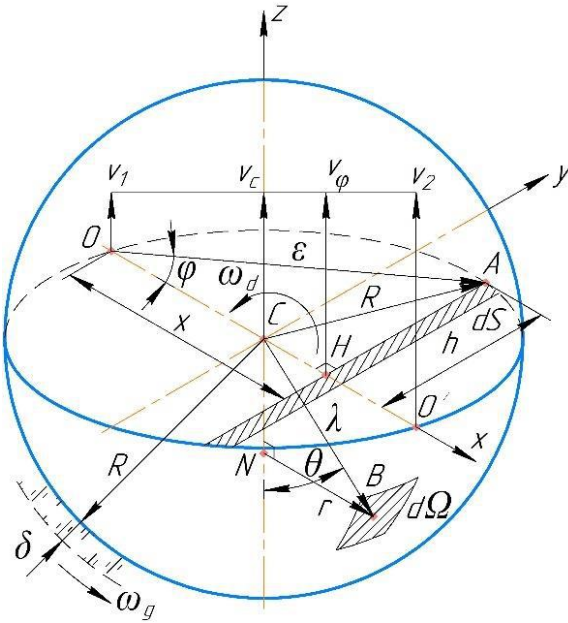


Рисунок 3.8 - Розрахункова схема руху частинки

Представлена більш детально модель та розрахунок показано в пункті 2.1 другого етапу НДР. При цьому, граничні швидкості  $v_1$  і  $v_2$  визначаються за виразом:

$$v_{1,2} = v_c \mp \omega_d R, \quad (3.6)$$

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.

Розподіл окружної швидкості разом із радіусом крапель визначається таким чином:

$$v_{\varphi} = v_1 + \omega_d x + \sum_{k=2}^{\infty} a_k x^k. \quad (3.7)$$

**Зовнішні сили та моменти, що діють на краплю.** Наступними рівняннями визначаються сила опору і її момент за взаємодії газового потоку і дисперсної краплини:

$$\begin{aligned} F_d &= - \int_{(S)} \frac{\psi \rho_g (v_r^2 + v_{\varphi}^2)}{2} dS = 8\psi \rho_g R^2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [v_r^2 + \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} (2R)^k a_k a_n x^{k+n}] \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi d\varphi; \\ M_d &= - \int_{(S)} \frac{\psi \rho_g (v_r^2 + v_{\varphi}^2)}{2} dS = 16\psi \rho_g R^3 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [v_r^2 + \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} (2R)^k a_k a_n x^{k+n}] \cos^4 \varphi \sin^2 \varphi d\varphi, \end{aligned} \quad (3.8)$$

де  $\rho_g$  – густина газу, кг/м<sup>3</sup>;

$v_r$  – радіальна швидкість, м/с;

$\psi$  – безрозмірний коефіцієнт опору, що можна прийняти як сталу;

$S$  – поперечний переріз краплі (рисунок 3.8):

$$\begin{aligned} dS &= 2h \cdot dx = 2 \cdot \varepsilon \sin \varphi \cdot dx = 2 \cdot 2R \cos \varphi \cdot \sin \varphi \cdot dx = \\ &= 4R \cos \varphi \sin \varphi \cdot d(\varepsilon \cos \varphi) = 4R \cos \varphi \sin \varphi \cdot d(2R \cos \varphi \cdot \cos \varphi) = \\ &= 8R^2 \cos \varphi \sin \varphi \cdot d(\cos^2 \varphi) = -16R^2 \cos^2 \varphi \sin^2 \varphi d\varphi. \end{aligned} \quad (3.9)$$

При обертальному русі крапель напруга зсуву на поверхні визначається за формулою Ньютона [129]:

$$\begin{aligned} \tau &= \mu_g \frac{d(\omega_d \cdot r)}{d\lambda} = \mu_g \frac{d(\omega_d \cdot \lambda \sin \theta)}{d\lambda} = \mu_g \left[ \omega_d \frac{d(\lambda \sin \theta)}{d\lambda} + \lambda \sin \theta \frac{d\omega_d}{d\lambda} \right] = \\ &= \mu_g \left[ \omega_d (\sin \theta + \lambda \cos \theta \frac{d\theta}{d\lambda}) + \lambda \sin \theta \frac{d\omega_d}{d\lambda} \right], \end{aligned} \quad (3.10)$$

де  $\mu_g$  – динамічна в'язкість газу, Па·с;

$r$  – радіус обертання, м;

$\lambda$  – нормальна координата, м (рис. 3.8).

За умови кількох припущень, таких як несуттєва зміна кутової швидкості  $\omega_g$  у пограничному шарі та нормального градієнту  $\frac{d\theta}{d\lambda}$  поблизу поверхні є можливість запису виразу наступним чином:

$$\frac{d\omega_d}{d\lambda} = \frac{\omega_d - \omega_g}{\delta}; \frac{d\theta}{d\lambda} = \left(\frac{d\theta}{d\lambda}\right)_s = const. \quad (3.11)$$

При цьому, після ідентичних перетворень є можливість отримання наступного спрощення рівняння (3.10):

$$\tau = \mu_g \left[ \left(1 + \frac{R}{\delta}\right) \omega_d - \frac{R}{\delta} \omega_g \right] \sin\theta + \mu_g R \left(\frac{d\theta}{d\lambda}\right)_s \cos\theta. \quad (3.12)$$

Сила і момент тертя, які діють на поверхню краплі  $\Omega$ , визначаються так:

$$\begin{aligned} F_f &= \iint_{(\Omega)} \tau d\Omega = 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\pi} \tau R^2 \sin\theta d\theta d\varphi; \\ M_f &= \iint_{(\Omega)} \tau r d\Omega = 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\pi} \tau R^3 \sin\theta d\theta d\varphi, \end{aligned} \quad (3.13)$$

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

Підміна залежності (3.12) на залежність (3.13), після інтегрування дає змогу отримати вираз для сили тертя:

$$\begin{aligned} F_f &= \pi^2 R^2 \mu_g \left[ \left(1 + \frac{R}{\delta}\right) \omega_d - \frac{R}{\delta} \omega_g \right]; \\ M_f &= \frac{8}{3} \pi R^3 \mu_g \left[ \left(1 + \frac{R}{\delta}\right) \omega_d - \frac{R}{\delta} \omega_g \right]. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Подібним чином розглянуто в роботах виконавців [146, 147]:

- 1) інтенсифікацію внутрішніх потоків в краплі;
- 2) рівняння руху крапель в газовому потоці;
- 3) стабільність руху краплі;



- 4) визначення порушень руху крапель;
- 5) рівномірне обертання рідкої краплі в квазі-рівноважному положенні.
- 6) експериментальні та числові дослідження.

### 3.1.3 Математична модель процесу осадження краплин золю в розчині аміаку

У пункті 2.2 [146] визначено, що актуальною задачею є розробка аналітичних методів з розв'язання диференціальних рівнянь осадження частинок із урахуванням дробового походження сили Бассе. У цьому ж пункті було визначено завдання для досягнення цієї мети:

- обґрунтування дробових походжень сили Бассе;
- отримання рівняння дробового порядку осаджень частинок;
- розв'язування отриманих рівнянь аналітично;
- валідація отриманих загальних рішень аналітично;
- апроксимація чисельно отриманого тематичного дослідження отриманими аналітичними залежностями.

**Рівняння руху частинок із урахуванням сили Бассе.** Відповідно до рівнянь руху малої жорсткої кулі у неоднорідному потоці [130], рівняння руху частинки, яка рухається зі швидкістю, що змінюється у часі у проекції на позитивний тангенціальний напрямок, матиме наступний вигляд:

$$m_p \frac{dv_p(t)}{dt} = F_g - F_A - F_d - F_f - F_B, \quad (3.15)$$

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/с<sup>2</sup>;

$F_A = m_p g$ —сила Архімеду, Н;

$m_f$  — додана маса потоку, кг;

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

$\mu$  — 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 [131]:

$$F_B = 6\pi\mu a^2 \int_0^t \frac{\frac{dv_p(\tau)}{d\tau}}{\sqrt{\pi v(t-\tau)}} d\tau, \quad (3.16)$$

де  $v$  — кінематична в'язкість, м<sup>2</sup>/с;

$\tau$  — параметр часу, с.

Тому, враховуючи згадані вище вирази, можна переписати рівняння (3.15) наступним чином:

$$\left(m_p + \frac{1}{2} m_f\right) \frac{dv_p(t)}{dt} + 6\sqrt{\pi\rho\mu} a^2 \int_0^t \frac{\frac{dv_p(\tau)}{d\tau}}{\sqrt{t-\tau}} d\tau + 6\pi\mu a v_p(t) = (m_p - m_f)g, \quad (3.17)$$

де  $\rho$  — густина рідини, кг/м<sup>3</sup>.

Вводячи параметри:

$$\alpha = \frac{3\pi\sqrt{\rho\mu} a^2}{m_p + \frac{1}{2} m_f}; \quad n = \frac{6\pi\mu a}{m_p + \frac{1}{2} m_f}; \quad v_{p\infty} = \frac{(m_p - m_f)g}{6\pi\mu a} \quad (3.18)$$

можна переписати інтегро-диференціальне рівняння (3.17) в таку форму:

$$\frac{dv_p(t)}{dt} + \frac{2\alpha}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{\frac{dv_p(\tau)}{d\tau}}{\sqrt{t-\tau}} d\tau + n v_p(t) = n v_{p\infty}, \quad (3.19)$$

де  $n$  — фактор релаксації,  $\text{с}^{-1}$ ;  
 $\alpha$  — коефіцієнт сили Бассе,  $\text{с}^{-1/2}$ ;  
 $v_{p\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} v(t)$  — стаціонарна швидкість,  $\text{м/с}$ .

**Диференціальні рівняння дробового порядку осідання частинок.** З метою подальшого аналітичного розв'язування рівняння (3.19) розглянуто інтегральну і похідну Ріман-Ліувіль [132] і дробову похідна Грюнвальда-Летнікова [133]:

$$\begin{aligned} I_{t_0,t}^{\beta} v_p(t) &= \frac{1}{\Gamma(\beta)} \int_{t_0}^t v_p(\tau) (t - \tau)^{\beta-1} d\tau; \\ D_{t_0,t}^{\beta} v_p(t) &= \frac{1}{\Gamma([\beta]-\beta)} \frac{d^{[\beta]}}{dt^{[\beta]}} \int_{t_0}^t v_p(\tau) (t - \tau)^{\beta-[\beta]+1} d\tau; \\ D_{t_0,t}^{\beta} v_p(t) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \left( \frac{t-t_0}{N} \right)^{\beta} \sum_{i=0}^N \frac{\Gamma(\alpha+i)}{i! \Gamma(\alpha)} v_p \left[ t - \frac{i}{N} (t - t_0) \right] = I_{t_0,t}^{-\beta} v_p(t), \end{aligned} \quad (3.20)$$

де  $\beta$  — дробовий порядок;  
 $t_0$  — початковий час,  $\text{с}$ ;  
 $\Gamma(\beta)$  — гамма-функція [134]:

$$\Gamma(\beta) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{\beta-1} dx, \quad \text{Re}(\beta) > 0. \quad (3.21)$$

Зв'язок між дробовими похідними визначає [135]:

$$D_{t_0,t}^{\gamma} \left[ \frac{d^r}{dt^r} v_p(t) \right] = \frac{d^r}{dt^r} \left[ D_{t_0,t}^{\gamma} v_p(t) \right] - \frac{(t-t_0)^{-\gamma-r+i}}{\Gamma(-\gamma-r+i+1)} \left[ \frac{d^i}{dt^i} v_p(t) \right]_{t=t_0}, \quad (3.22)$$

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

$$I_{0,t}^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{dv_p(t)}{dt} \right] = D_{0,t}^{\frac{1}{2}} [v_p(t)] - \frac{v_p(0)}{\sqrt{\pi t}}. \quad (3.23)$$

Порівняння виразів (3.16) та (3.23) із інтегро-диференціалом Рімана – Ліувіля (3.20) для значень  $\beta = 1/2$  і початкового моменту часу  $t_0 = 0$ , так як для випадку нульової початкової умови ( $v_p(0) = 0$ ), дає змогу визначення сили Бассе із погляду дробового обчислення:

$$F_B = 6\pi a^2 \sqrt{\mu\rho} I_{0,t}^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{dv_p(t)}{dt} \right] = 6\pi a^2 \sqrt{\mu\rho} D_{0,t}^{\frac{1}{2}} [v_p(t)]. \quad (3.24)$$

Таким чином, рівняння (3.19) набуває наступного вигляду:

$$\frac{dv_p(t)}{dt} + 2\alpha \frac{d^{\frac{1}{2}}v_p(t)}{dt^{\frac{1}{2}}} + nv_p(t) = nv_{p\infty}. \quad (3.25)$$

Це і є диференціальним рівнянням осадження частинок дробового порядку, що враховує силу Бассе. Тому, є можливість для більш точного моделювання процесів осадження дрібних частинок в рідинах, осадження аерозолів в потоці газу і осадження частинок газодисперсної системи.

**Загальне рішення диференціального рівняння дробового порядку осадження частинок.** Для аналітичного рішення рівняння (3.25) можна використати перетворення Лапласа [136] для початкової нульової умови ( $v_p(0) = 0$ ). При цьому отримується наступна порівняльна операція:

$$(s + 2\alpha\sqrt{s} + n)V_p(s) = \frac{nv_{p\infty}}{s}, \quad (3.26)$$

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

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

$$V_p(s) = \int_0^{\infty} v_p(t) e^{-st} dt, \quad (3.27)$$

яке можна визначити алгебраїчним рівнянням (3.26):

$$V_p(s) = \frac{nv_{p\infty}}{s(s+2\alpha\sqrt{s+n})} = nv_{p\infty} \left( \frac{a_1}{\sqrt{s}} + \frac{a_2}{s} + \frac{a_3}{\sqrt{s}-\theta_1} + \frac{a_4}{\sqrt{s}-\theta_2} \right), \quad (3.28)$$

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

При цьому,  $\theta = \sqrt{s}$ . Невідомі параметри  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , та  $a_4$  можна знайти з наступного матричного рівняння:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ -(\theta_1 + \theta_2) & 1 & -\theta_2 & -\theta_1 \\ \theta_1\theta_2 & -(\theta_1 + \theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & \theta_1\theta_2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}. \quad (3.29)$$

В результаті ряду перетворень, показаного в пункті 2.2 другого етапу із загальним рішенням диференціального рівняння дробового порядку осадження частинок, загальне рішення диференціального рівняння дробового порядку (3.25) осадження частинок, що враховує силу Бассе, набуває наступного вигляду:

$$v_p(t) = v_{p\infty} \left[ 1 - 2e^{-(n-2\alpha^2)t} \left( \cos 2\alpha\sqrt{n-\alpha^2}t - \frac{\alpha}{\sqrt{n-\alpha^2}} \sin 2\alpha\sqrt{n-\alpha^2}t \right) + \sum_{i=0}^{\infty} \frac{t^{\frac{i}{2}}}{\Gamma(\frac{i}{2}+1)} \sum_{r=0}^i \binom{i}{r} \alpha^{i-r} (n-\alpha^2)^{\frac{r}{2}} \left( \cos \frac{\pi i}{2} - \frac{\alpha}{\sqrt{n-\alpha^2}} \sin \frac{\pi i}{2} \right) \right]. \quad (3.30)$$

Перевірку отриманого загального рішення (3.30) диференціального рівняння дробового порядку (3.25) розглянуто як окремий випадок для  $\alpha = 0$ . Таким чином, рішення набуває вигляду:

$$v_{p0}(t) = v_{p\infty} \left[ 1 - 2e^{-nt} + E'_{\frac{1}{2},1}(\sqrt{nt}) \right], \quad (3.31)$$

із введенням модифікованої функції Міттаг - Лефлера:

$$E_{\gamma,\beta}^{<c>}(z) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{z^i}{\Gamma(\gamma i + \beta)} \cos \frac{\pi i}{2}, \quad (3.32)$$

При цьому, модифікована функція Міттаг – Лефлера матиме особливість:

$$E_{\frac{1}{2},1}^{<c>}(z) \equiv e^{-z^2}. \quad (3.33)$$

У цьому випадку рішення (3.31) набуває вигляду:

$$v_{p0}(t) = v_{p\infty}(1 - e^{-nt}), \quad (3.34)$$

що відповідатиме традиційному [137].

Таким чином, загальним рішенням (3.30) відкриваються нові області у вивченні процесів осадження частинок потоку рідин.

В результаті аналізу головних порядків загального рішення отримано графік, представлений на рисунку 3.9.

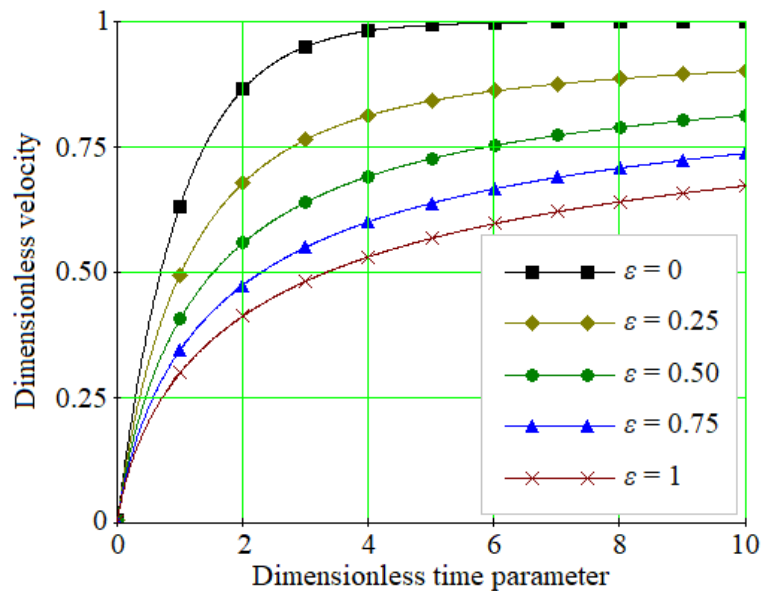


Рисунок 3.9 - Порівняльний аналіз безрозмірних рішень для інтегро-диференціальних рівнянь дробового порядку осадження частинок

Всі рішення асимптотично наближені до горизонтальних ліній максимальних швидкостей седиментації.

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

Лише теоретичним шляхом питання витікань струменю через отвори вирішити неможливо. Свідченням цьому є наведені в першому розділі другого етапу емпіричні залежності для визначення коефіцієнту  $\mu$ .

Стосовно експериментальних послідовних витікання за наявності в посудині циркуляції, то виникають питання, серед яких особливого значення набувають твердження, що при витіканні із циркуляцією, в центрі склянки з'явиться вихрова трубка, що займає центральну частину отвору, тому витікання відбуватиметься не повним отвором, а в вигляді полого кільця. Тому, чим більшою є циркуляція, тим більшим буде діаметр вихрової трубки, а отже, і кільцевий пасок, через який проходить витікання.

В незалежності від способу створення моментів швидкості, їх завжди можна віднести до довільного радіусу. У проведених дослідах віднесено його

до внутрішнього радіусу стакану  $r_0$ . Момент віднесений до радіусу стакану, що підводиться зовні, прийнято вважати відомим (або заданим). Очевидно, підведені моменти швидкості будуть витратитись на закручування рідини у стакані  $M_{ж}$  та на подолання моментів сил тертя  $M_m$  об стінки стакану, тобто, момент:

$$\mu = \mu_{ж} + \mu_{т} \quad (3.35)$$

що приходить на закручування рідини у стакані  $\mu_{ж}$  та буде створювати циркуляцію у стакані. Момент виражено через кількість закрученої рідини та середній радіус стакану  $r_{ср}$ .

$$\mu_{ж} = \rho \frac{\pi D^2}{4} H \cdot V_{иср} \cdot r_{ср} \quad (3.36)$$

де  $V_{иср}$  – окружна швидкість середнього радіусу  $r_{ср} = \frac{r_0}{2}$

Із урахуванням

$$V_{иср} = \frac{\Gamma}{2\pi r_{ср}} = \frac{2\Gamma}{\pi D} \quad (3.37)$$

отримано

$$\mu_{ж} = \frac{1}{8} \rho D^2 \Gamma H \quad (3.38)$$

Тому, якщо визначати момент, що витрачений на стінках стакану на подолання сил тертя, можна буде визначати значення циркуляції  $\Gamma$  у залежності від підведеного моменту  $\mu$  та навпаки, - задавшись циркуляцією буде можливість підрахунку необхідного для її створення моменту.



Диференційне рівняння для пограничного шару значно спрощується, але дане вирішення пов'язано з певними труднощами. Тому, слід скористатися теоремою про зміну кількості руху із застосуванням її до елементарної ділянки пограничного шару, що позначена на схемі, як 1, 2, 3 та 4.

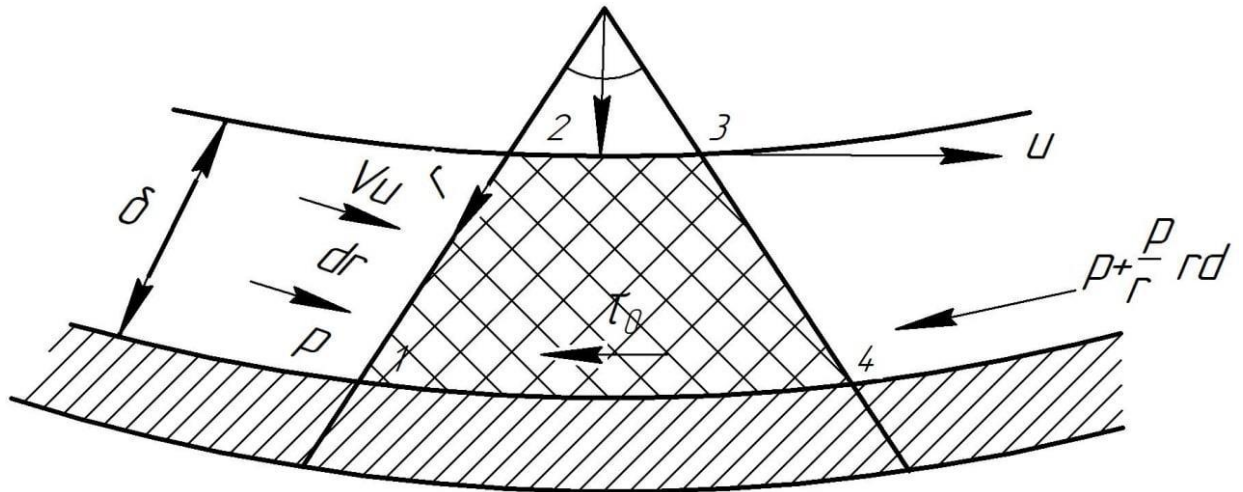


Рисунок 3.10 – Розрахункова схема пограничного шару у стінки стакану

З прийняттям руху в стакані, що встановився, теорема щодо зміни кількості руху виглядатиме так:

$$\int_S \rho V V_h dS = \Sigma \bar{F} \quad (3.39)$$

Зміни кількості руху виділеного об'єму осі  $u$ :

$$\int_S \rho V_u V_h dS \quad (3.40)$$

Через 1-2 проходить кількість рідини:

$$m_{1-2} = \int_0^\delta \rho V_u dr \quad (3.41)$$

Через 3-4 проходить кількість рідини:

$$m_{3-4} = \int_0^S \rho \left( V_u + \frac{\partial V_u}{r \partial \theta} r d\theta \right) dr \quad (3.42)$$

Кількість рідини, що виходить з об'єму 1,2,3,4:

$$\Delta m = m_{3-4} - m_{1-2} = \int_0^\delta \rho \frac{\partial V_u}{\partial \theta} r d\theta dr = \frac{\partial}{r \partial \theta} r d\theta \int_0^\delta \rho V_u dr \quad (3.43)$$

В силу нерозривності руху, через межу 2-3 увійде така ж сама кількість рідини із кількості руху

$$K_{2-3} = -U_0 \frac{\partial}{r \partial \theta} r d\theta \int_0^\delta \rho V_u dr \quad (3.44)$$

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

При цьому, знак мінус відповідатиме приросту кількості руху, а плюс – зменшенню.

Кількість руху, яка входить через 1-2

$$K_{1-2} = \int_0^\delta \rho V_u^2 dr = F(U) \quad (3.45)$$

Згодом, кількість руху, що виходить із об'єму у напрямку  $U$ , визначатиметься, давши повний приріст функції  $F(U)$  у напрямку  $U$ .

$$\Delta K_u = [F(U)] du = \frac{\partial}{r \partial \theta} r d\theta \int_0^\delta \rho V_u^2 dr \quad (3.46)$$

Отже,

$$\rho V_u V_a dS = \frac{\partial}{r \partial \theta} r d\theta \int_0^\delta \rho V_u^2 dr - U \frac{\partial}{r \partial \theta} r d\theta \int_0^\delta \rho V_u dr \quad (3.47)$$

Сили, які діють на виділений об'єм у проекціях на  $U$ .

$$\sum \bar{F}_u = F_{(1-2)u} + F_{(2-3)u} + F_{(3-4)u} + F_{(1-4)u} + G_{u.v} \quad (3.48)$$

$$F_{(1-2)u} = p \int_0^\delta dr = p\delta \quad (3.49)$$

Тоді, коли верхня межа пограничного шару лежатиме на концентричній окружності, проекція рівнодіючої  $F(2-3)$  на напрямок  $U$  буде рівною нулю.

$$F_{(2-3)u} = 0 \quad (3.50)$$

$$F_{(3-4)u} = P \left( + \frac{\partial p}{r \partial \theta} r d\theta \right) \delta \quad (3.51)$$

$$F_{(1-4)u} = (r + dr) d\theta \tau_0 \quad (3.52)$$

$$G_{u.v} = 0 \quad (3.53)$$

Тоді

$$\sum F_u = P\delta - P\delta - \delta \frac{\partial P}{r \partial \theta} r d\theta - \tau_0 d\theta \cdot r - \tau_0 d\theta dr \quad (3.54)$$

Нехтуючи останнім членом, отримано:

$$\sum F_u = -\tau_0 r d\theta - \delta \frac{\partial P}{r \partial \theta} r d\theta \quad (3.55)$$

Остаточною теоремою щодо зміни кількості руху, застосованого до виділеного об'єму пограничного шару, прийняла вигляд:

$$\frac{\partial}{r \partial \theta} \int_0^\delta \rho V_u^2 dr - U_0 \frac{\partial}{r \partial \theta} \int_0^\delta \rho V_u dr = -\tau_0 \delta \frac{\partial p}{r \partial \theta} \quad (3.56)$$

Окружна швидкість в границі пограничного шару виражається через циркуляцію

$$U_0 = \frac{\Gamma}{2\pi r_0} \quad (3.57)$$

при цьому  $r_0$  – можна прийняти рівним внутрішньому радіусу стакану.

Застосувавши рівняння Бернуллі для струменю, що лежить у верхній границі пограничного шару, отримано

$$P + \frac{\rho u_0^2}{2} = const \quad (3.58)$$

В результаті інтегрування, інтегральне відношення (3.56) прийняло вигляд:

$$\frac{\partial}{r\partial\theta} \int_0^\delta \rho V_u^2 dr - U_0 \frac{\partial}{r\partial\theta} \int_0^\delta \rho V_u dr = -\tau_0 \quad (3.59)$$

Використавши диференціальні рівняння пограничного шару циліндричної системи координат, закон розподілу швидкості  $V_u = V_u(r)$  прийняв вигляд:

$$V_u = U_0 \left[ 1 - \frac{r^2(3\delta+r)}{2\delta^3} \right] \quad (3.60)$$

Друге додаткове співвідношення знайдено, використавши закон Ньютона для внутрішнього тертя (за ламінарної течії).

$$\tau_0 = \mu \left( \frac{\partial V_u}{\partial r} \right)_{r=\delta}, \quad (3.61)$$

Врахувавши отриману залежність для швидкості  $V_u$ , отримано

$$\frac{\partial V_u}{\partial r} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{U_0}{\delta^3} \cdot r(2\delta + r), \quad (3.62)$$

Тоді:

$$\left(\frac{\partial V_u}{\partial r}\right)_{r=\delta} = -\frac{9}{2} - \frac{U_0}{\delta} = -4,5 \frac{U_0}{\delta}, \quad (3.63)$$

Підстановка в інтегральне співвідношення (3.59) знайденого виразу для швидкості  $V_u$  та дотичного напруження  $\tau_0$  отримано диференціальне рівняння, що містить невідому величину  $\delta$ , розв'язуючи яке знайдено  $\delta = \delta(u)$ .

Обчислення проведено в такий спосіб:

$$\begin{aligned} \int_0^\delta \rho V_u dr &= \int_0^\delta \rho U_0 \left[1 - \frac{r^2(3\delta+r)}{2\delta^3}\right] dr = \int_0^\delta \rho U_0 dr - \\ \int_0^\delta \rho \frac{U_0 r^2 \cdot 3\delta}{2\delta^3} dr - \int_0^\delta \rho \frac{U_0 r^3}{2\delta^3} dr &= \rho U_0 r \int_0^\delta - \frac{\rho U_0 r^3}{2\delta^2} \int_0^\delta - \frac{\rho U_0 r^4}{8\delta^3} \int_0^\delta = \rho U_0 \delta - \\ \frac{\sigma U_0}{2} - \frac{\rho U_0 \delta}{8} &= \frac{3}{8} \rho U_0 \delta, \quad (3.64) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_0^\delta \rho V_u^2 dr &= \int_0^\delta \rho U_0^2 \left[1 - \frac{r^2(3\delta+r)}{2\delta^3}\right]^2 dr = \\ 12 \int_0^\delta \rho U_0^2 \left[1 - \frac{r^2(3\delta+r)}{\delta^3} + \frac{r^4(3\delta+r)^2}{4\delta^6}\right] dr &= \int_0^\delta \rho U_0^2 dr - \int_0^\delta \rho U_0^2 \frac{r^2(3\delta+2)}{\delta^3} dr + \\ \int_0^\delta \rho U_0^2 \frac{r^4(9\delta^2+6\delta r+r^2)}{4\delta^6} dr &= \rho U_0^2 \int_0^\delta - \frac{\rho U_0^2}{\delta^3} \left(\frac{3\delta r^3}{3} + \frac{r^4}{4}\right) \int_0^\delta + \frac{\rho U_0^2}{4\delta^6} \left(\frac{9\delta^2 r^5}{5} + \frac{6\delta r^6}{6} + \right. \\ \left. \frac{r^7}{7}\right)_0^\delta &= U_0^2 \delta - \rho U_0^2 \delta - \frac{\rho U_0^2 \delta^2}{4} + \frac{9 \cdot \rho U_0^2 \delta}{20} + \frac{\rho U_0^2 \delta}{4} + \frac{\rho U_0^2 \delta}{28} = \frac{6}{10} \rho U_0^2 \delta, \quad (3.65) \end{aligned}$$

Підставивши ці значення інтегралів у співвідношення (3.59), отримано диференціальне рівняння:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \cdot \frac{6}{70} \rho U_0^2 \delta - U_0 \frac{\partial}{\partial r} \frac{3}{8} U_0 \delta = 4,5 \mu \frac{U_0}{\delta} \quad (3.66)$$

Замінюючи  $rd\theta$  на  $du$  і спрощуючи, отримано:

$$-\frac{91}{280} \frac{d}{du} \rho U_0 \delta^2 = 4,5\mu \quad (3.67)$$

$$\frac{81}{280} \rho d(U_0 \delta^2) = 4,5\mu dU \quad (3.68)$$

В результаті інтегрування, отримано:

$$\frac{81}{280} \rho U_0 \delta^2 = -4,5\mu u + c \quad (3.69)$$

Звідки, товщина пограничного шару:

$$\delta = 1,86 \sqrt{\frac{c - 4,5\mu}{\rho} \cdot \frac{u}{u_0}} \quad (3.70)$$

де  $u$  – буде не окружною швидкістю, а координатою в напрямку  $u = rd\theta$ .

Визначено, що товщина граничного шару залежатиме від розташування точки на окружності. Враховуючи, що рух у розглянутому випадку усталений і симетрично відносно осі, то товщина граничного шару не має залежати від  $U$ . Для практичних задач з визначення товщини граничного шару можна використовувати формулу:

$$\delta = 1,86 \sqrt{\frac{c_1 - 4,5\mu}{\rho} \cdot \frac{1}{U_0}} \quad (3.71)$$

За наведеними вище міркуваннями виключена координата  $U$ , але введено нову постійну  $C_1$ .

### 3.1.5 Розрахунок процесу піролізу (термічного розкладу) метану для нанесення піровуглецевого покриття на гранульований $Al_2O_3$

Гранульований  $Al_2O_3$  завдяки своїм деяким фізико-хімічним характеристикам може слугувати моделлю мікросферичного ядерного палива.

Для орієнтовного визначення продуктів реакцій проведений розрахунок процесу піролізу (термічної деструкції) метану у присутності молекул  $Al_2O_3$  у співвідношенні:  $Al_2O_3 : CH_4 = 1 : 3$ . Рівноважні криві даної системи наведені на рис. 3.11. Рівноважний склад даної системи наведено у табл. 3.1.

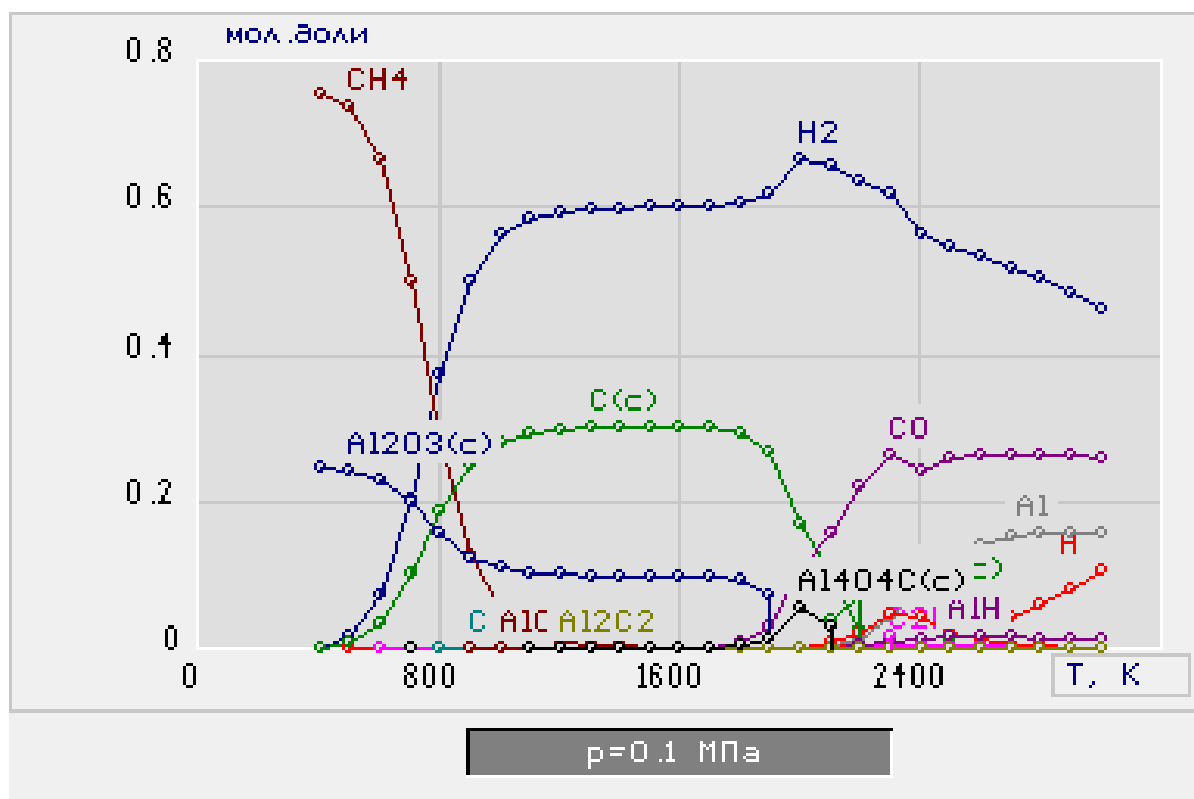


Рисунок 3.11 - Рівноважні криві системи « $Al_2O_3 : CH_4 = 1 : 3$ »

Як показують дані розрахунки з 600 К починає метан починає розкладатись на водень та вуглець. Зі збільшенням температури вихід вуглецю та водню збільшується. У даній системі молекула  $Al_2O_3$  до 1500 К стабільна, однак вище 1500 К утворений з метану вуглець починає відновлювати  $Al_2O_3$

до Al з утворенням CO. За температур вище 2600 К збільшується концентрація утворення атомарного водню.

Таблиця 3.1 - Рівноважний склад системи «Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : CH<sub>4</sub> = 1 : 3»

T	H	H <sub>2</sub>	C	CO	CH <sub>4</sub>	Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0	1,9288E-22	0,0008316	0,0004156	2,1151E-19	20,216	1,9288E-22	6,62679
400	1,9288E-22	0,0376365	0,0188146	1,9288E-22	20,1976	1,9288E-22	6,62679
500	1,9997E-20	0,405015	0,202488	1,9288E-22	20,0139	1E-30	6,62679
600	3,0719E-16	2,07775	1,03882	1E-30	19,1774	1,1573E-21	6,62679
700	3,2099E-13	6,81598	3,4079	1,9288E-22	16,8082	1E-30	6,62679
800	6,1508E-11	15,9598	7,97979	5,0347E-15	12,2363	1E-30	6,62679
900	3,5212E-09	26,8941	13,447	3,9426E-14	6,76921	3,4373E-16	6,62679
1000	8,1412E-08	34,3427	17,1713	4,8964E-11	3,04499	1E-30	6,62679
1100	9,9487E-07	37,782	18,891	1,832E-08	1,32538	1,3654E-10	6,62679
1200	7,8038E-06	39,1989	19,5994	7,289E-07	0,616934	4,6485E-09	6,62679
1300	0,0000442	39,8038	19,9018	0,0000162	0,31446	9,0526E-08	6,62677
1400	0,0001956	40,0831	20,041	0,0002288	0,174701	1,1419E-06	6,62656
1500	0,0007096	40,2226	20,1075	0,0022537	0,104604	0,0000102	6,62457
1600	0,0021954	40,2967	20,1223	0,0165737	0,0667229	0,0000689	6,61043
1700	0,005961	40,3363	20,0217	0,0959982	0,044833	0,0003702	6,53184
1800	0,014558	40,3539	19,4858	0,458419	0,0313003	0,0016557	6,17303
1900	0,0328434	40,3523	17,3293	1,89864	0,0221228	0,0064732	4,74723
2000	0,071074	40,3258	10,1431	6,71005	0,0149954	0,0260177	1,5013E-23
2100	0,141112	40,2405	6,13524	9,70015	0,0108157	0,187212	1E-30
2200	0,268823	40,0548	1,56573	13,7679	0,0076742	0,801076	1E-30
2300	0,486529	39,709	1,1492E-26	16,8359	0,0054088	2,60071	1E-30
2400	0,817582	39,1921	2,61297	16,803	0,0042126	5,86665	1E-30
2500	1,31207	38,6791	0,665399	18,251	0,0033235	8,44871	1E-30
2600	2,02271	38,3573	1,4086E-21	19,0459	0,0021462	10,0978	1E-30
2700	3,00962	38,0393	1E-30	19,4348	0,0012506	11,0541	1E-30
2800	4,33761	37,509	1E-30	19,6507	0,0007623	11,6435	1E-30
2900	6,07721	36,7403	2,8625E-30	19,7638	0,0004871	12,0078	2,8625E-30
3000	8,29981	35,7075	2,8625E-30	19,821	0,0003229	12,2423	2,8625E-30

Однак маючи попередній експериментальний досвід процесу піролізу вуглеводневих газів для уникнення інтенсивного сажеутворення доцільно додавати у систему інертний газ. Рівноважні криві системи «Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : CH<sub>4</sub> : N<sub>2</sub> = 1 : 3 : 0.5» наведені на рис. 3.12. Рівноважний склад даної системи наведено у табл. 3.2.



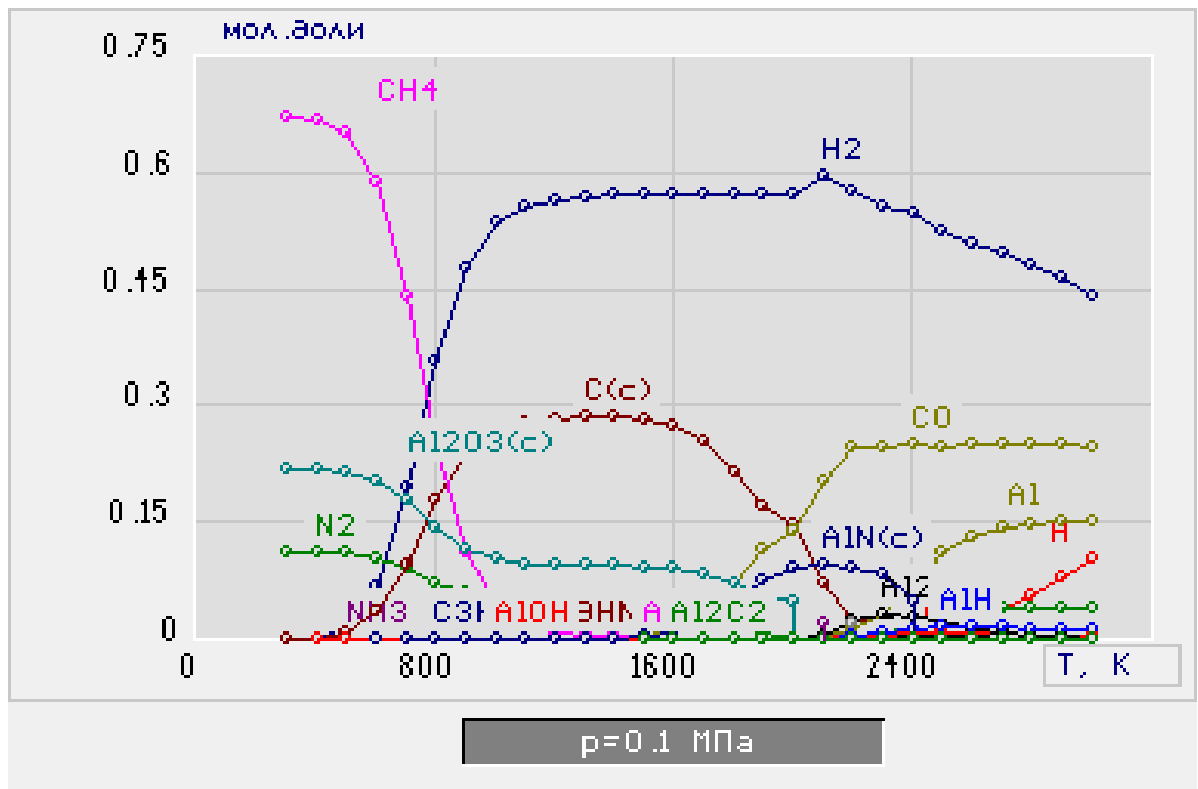


Рисунок 3.12 - Рівноважні криві системи «Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : CH<sub>4</sub> : N<sub>2</sub> = 1 : 3 : 0.5»

Як показують розрахункові дані, до температури 1500 К азот суттєво не впливає на цільові продукти реакції, однак після 1500 К в системі можливо утворення різних азотовмісних сполук з вуглецем та воднем. Для уникнення утворення даних сполук одним з варіантів є додавання іншого інертного газу - аргону. Рівноважні криві системи «Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : CH<sub>4</sub> : Ar = 1 : 3 : 0.5» наведені на рис. 3.13. Рівноважний склад даної системи наведено у табл. 3.3.

Результати розрахунків вказують, що аргон не впливає на хімізм процесу. Для визначення впливу збільшення концентрації метану проведений розрахунок у співвідношенні реагуючих речовин: «Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : CH<sub>4</sub> : Ar = 1 : 5 : 0.5». Рівноважні криві даної системи наведені на рис. 3.14. Рівноважний склад даної системи наведено у табл. 3.4.

Таблиця 3.2 - Рівноважний склад системи «Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : CH<sub>4</sub> : N<sub>2</sub> = 1 : 3 : 0.5»

T	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C	CO	CH <sub>4</sub>	Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
300	0,0008203	3,0843	0,0013698	4,4596E-23	18,468	1,9288E-22	6,0541
400	0,0371387	3,08319	0,0212001	1E-30	18,4481	1,9288E-22	6,0541
500	0,399346	3,08171	0,204509	1E-30	18,2648	1,9288E-22	6,0541
600	2,04195	3,0802	1,02804	5,992E-19	17,4411	1,9288E-22	6,0541
700	6,63767	3,07926	3,32729	1,1064E-10	15,1418	1,9288E-22	6,0541
800	15,2727	3,07954	7,64435	1,8888E-08	10,8247	1,9288E-22	6,0541
900	25,2058	3,08097	12,6088	1,0386E-06	5,86037	1,9288E-22	6,0541
1000	31,7354	3,08244	15,8713	0,0000248	2,59788	4,8352E-20	6,05409
1100	34,6876	3,08319	17,3454	0,0003206	1,1232	5,8193E-17	6,05399
1200	35,8925	3,08259	17,9442	0,0026547	0,521357	2,0735E-14	6,0532
1300	36,4044	3,07761	18,1852	0,015683	0,265363	2,9401E-12	6,04883
1400	36,639	3,05729	18,2437	0,071184	0,147196	2,0383E-10	6,03029
1500	36,7537	2,99031	18,1051	0,261277	0,087821	8,0571E-09	5,96687
1600	36,8108	2,80415	17,5834	0,801691	0,0555147	2,062E-07	5,78665
1700	36,8366	2,36843	16,2996	2,08421	0,0365859	3,864E-06	5,35905
1800	36,8444	1,55816	13,8794	4,49307	0,0248006	0,0000613	4,55601
1900	36,8425	0,598882	10,9876	7,37667	0,0173748	0,0009811	3,59456
2000	36,8241	0,122346	9,43655	8,9186	0,0128232	0,0166741	3,07208
2100	36,7455	0,0817698	4,44406	12,517	0,0091505	0,140927	7,9599E-30
2200	36,557	0,109627	1,41816	15,5042	0,006597	0,72005	1E-30
2300	36,215	0,315712	1,74322	16,0464	0,0050073	2,0475	1E-30
2400	35,6133	1,29634	0,282977	16,2285	0,0037796	4,35382	1E-30
2500	35,1631	2,7149	6,1421E-30	16,5014	0,0022342	7,53663	1E-30
2600	34,9629	2,78241	1E-30	17,2131	0,0013039	9,00162	1E-30
2700	34,6574	2,84029	1E-30	17,6299	0,0007365	9,93954	1E-30
2800	34,1728	2,88504	1E-30	17,8646	0,0004185	10,523	1E-30
2900	33,4665	2,91616	1E-30	17,9974	0,0002471	10,8973	1E-30
3000	32,5114	2,93603	1E-30	18,072	0,0001532	11,1454	1E-30

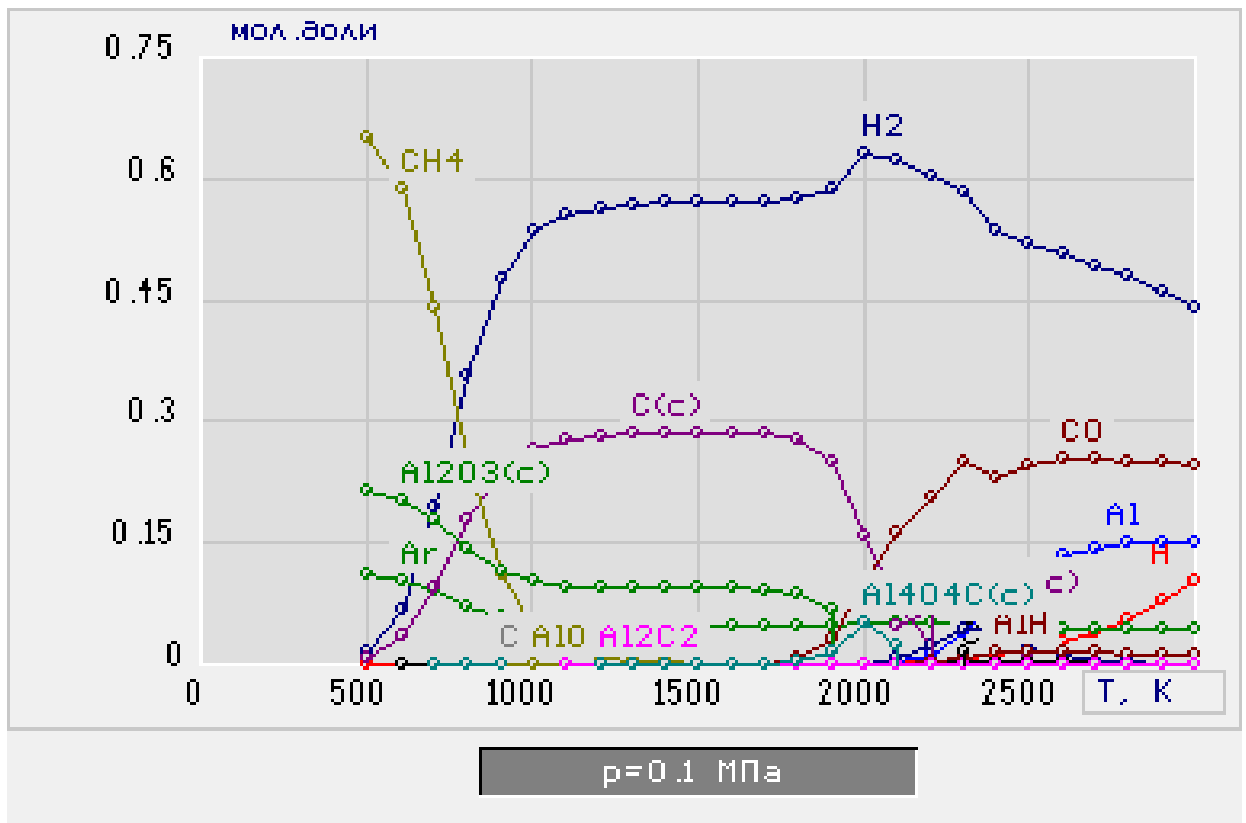


Рисунок 3.13 – Рівноважні криві системи «Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : CH<sub>4</sub> : Ar = 1 : 3 : 0.5»

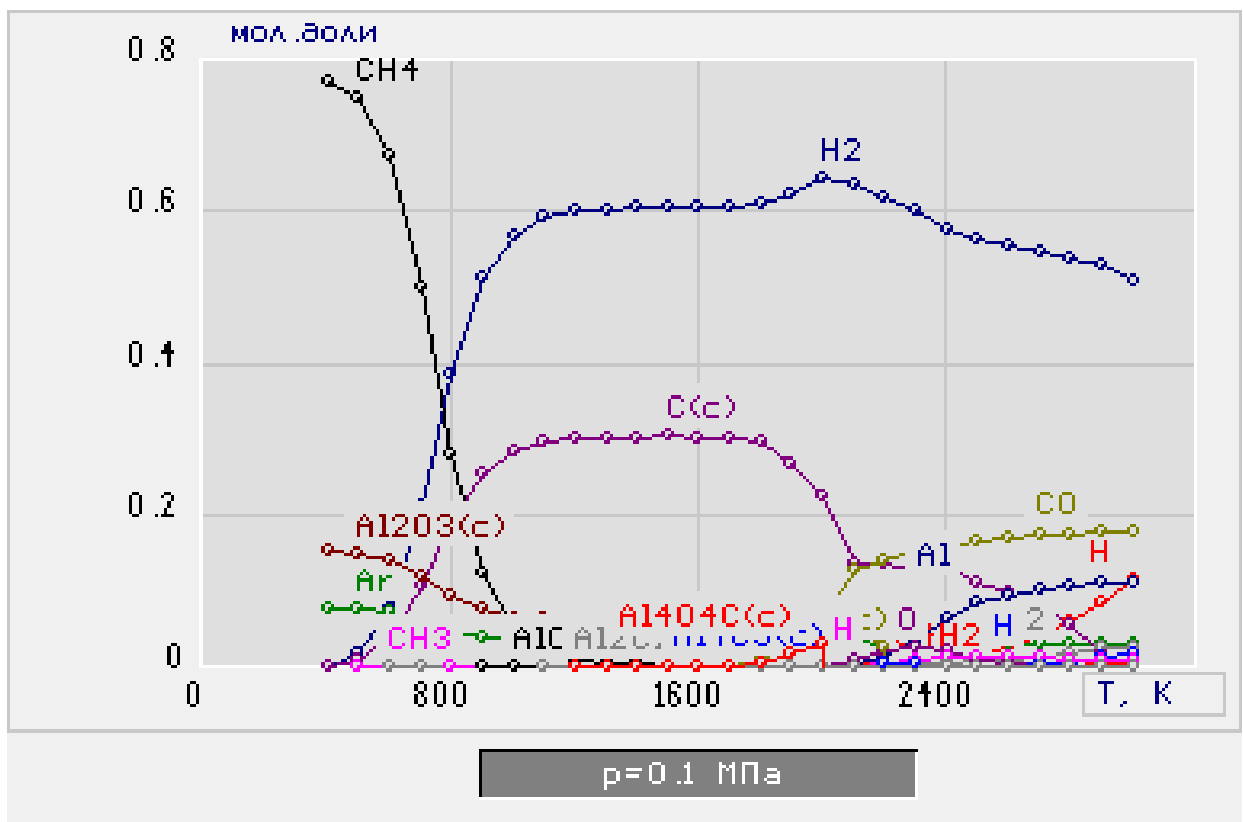


Рисунок 3.14 - Рівноважні криві системи «Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : CH<sub>4</sub> : Ar = 1 : 5 : 0.5»

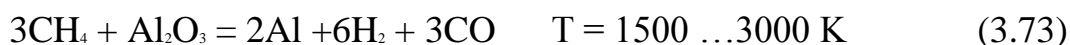
Таблиця 3.3 - Рівноважний склад системи «Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : CH<sub>4</sub> : Ar = 1 : 3 : 0.5»

T	H <sub>2</sub>	Ar	C	CO	CH <sub>4</sub>	Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0	0,0007915	2,98006	0,0003956	1,1548E-17	17,8093	1,5629E-18	5,83788
0	0,0358288	2,98006	0,0179114	2,8625E-20	17,7918	1,4252E-21	5,83788
500	0,385197	2,98006	0,192583	1,9288E-22	17,6171	1E-30	5,83788
600	1,96977	2,98006	0,98484	1,9288E-22	16,8247	1E-30	5,83788
700	6,40337	2,98006	3,20161	1,9288E-22	14,6078	1E-30	5,83788
800	14,7334	2,98006	7,36663	2,2948E-19	10,4428	2,2696E-14	5,83788
900	24,3135	2,98006	12,1567	2,3637E-14	5,65285	1E-30	5,83788
1000	30,6084	2,98006	15,3041	2,6926E-11	2,50548	1E-30	5,83788
1100	33,4531	2,98006	16,7265	1,1196E-08	1,08314	2,576E-10	5,83788
1200	34,6138	2,98006	17,3069	6,9743E-07	0,502759	4,4478E-09	5,83788
1300	35,1074	2,98006	17,5536	0,0000155	0,255956	8,6521E-08	5,83787
1400	35,3349	2,98006	17,6669	0,0002186	0,14212	1,0908E-06	5,83767
1500	35,4484	2,98006	17,7206	0,0021523	0,0850719	9,7382E-06	5,83577
1600	35,5085	2,98006	17,7295	0,0158261	0,054256	0,0000658	5,82226
1700	35,5403	2,98006	17,6307	0,0916602	0,0364529	0,0003535	5,74721
1800	35,5538	2,98006	17,1177	0,43768	0,0254482	0,0015808	5,40461
1900	35,5508	2,98006	15,0588	1,81266	0,0179857	0,0061801	4,0433
2000	35,5252	2,98006	8,93008	5,92174	0,0123214	0,0263001	3,4692E-24
2100	35,4477	2,98006	4,3768	9,25973	0,0087919	0,178712	1E-30
2200	35,2775	2,98006	1,46122	12,1691	0,0063528	0,772875	1E-30
2300	34,969	2,98006	9,1526E-27	14,868	0,0045397	2,40689	1E-30
2400	34,5147	2,98006	2,21082	14,8917	0,0035205	5,33825	1E-30
2500	34,0628	2,98006	0,512107	16,1527	0,0027841	7,59857	1E-30
2600	33,7898	2,98006	7,8897E-22	16,8168	0,0017733	8,99625	1E-30
2700	33,497	2,98006	1E-30	17,1445	0,0010349	9,80767	1E-30
2800	33,0144	2,98006	1E-30	17,3246	0,0006325	10,3049	1E-30
2900	32,3191	2,98006	2,8625E-30	17,4182	0,0004054	10,6118	2,8625E-30
3000	31,3884	2,98006	2,8625E-30	17,4652	0,0002692	10,8096	2,8625E-30

Таблиця 3.4 - Рівноважний склад системи «Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : CH<sub>4</sub> : Ar = 1 : 5 : 0.5»

T	H <sub>2</sub>	Ar	C(c)	CO	CH <sub>4</sub>	Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
0	0,0010759	2,50325	0,0005377	3,1391E-17	24,9331	1,4252E-21	4,90382
400	0,0486906	2,50325	0,024341	1,1573E-21	24,9093	1,9288E-22	4,90382
500	0,523743	2,50325	0,261849	1E-30	24,6717	1E-30	4,90382
600	2,68152	2,50325	1,3407	1E-30	23,5927	1,9288E-22	4,90382
700	8,74742	2,50325	4,37361	1E-30	20,5596	1,9288E-22	4,90382
800	20,2618	2,50325	10,1308	1,1067E-17	14,8024	2,7998E-20	4,90382
900	33,7048	2,50325	16,8523	2,5449E-14	8,08103	2,4586E-16	4,90382
1000	42,6621	2,50325	21,331	6,8128E-11	3,60244	1E-30	4,90382
1100	46,7441	2,50325	23,372	1,3921E-08	1,56151	3,9659E-10	4,90382
1200	48,4159	2,50325	24,2079	9,4545E-07	0,725599	6,0295E-09	4,90382
1300	49,1278	2,50325	24,5638	0,000021	0,369578	1,1734E-07	4,9038
1400	49,4562	2,50325	24,7274	0,0002965	0,205253	1,4796E-06	4,90353
1500	49,6202	2,50325	24,8051	0,0029198	0,122876	0,0000132	4,90095
1600	49,7071	2,50325	24,8199	0,0214703	0,0783708	0,0000892	4,88263
1700	49,7533	2,50325	24,6872	0,124354	0,0526567	0,0004795	4,78082
1800	49,7732	2,50325	23,9919	0,593805	0,0367612	0,0021446	4,31602
1900	49,7699	2,50325	21,1985	2,4593	0,0259817	0,0083847	2,46912
2000	49,7305	2,50325	17,3749	5,06884	0,0186985	0,0512329	6,1484E-27
2100	49,6256	2,50325	10,5702	9,98147	0,0132198	0,256152	1E-30
2200	49,3797	2,50325	10,8687	11,0645	0,0099291	1,13766	1E-30
2300	49,003	2,50325	10,4406	12,5398	0,0075368	2,85471	1E-30
2400	48,5012	2,50325	10,9655	13,0532	0,0059012	5,34001	1E-30
2500	47,9618	2,50325	9,51235	13,9666	0,0047503	7,02001	2,8625E-30
2600	47,2705	2,50325	8,24625	14,4363	0,0038907	7,99251	1E-30
2700	46,3182	2,50325	6,81749	14,6155	0,0032066	8,46595	2,8625E-30
2800	44,9887	2,50325	4,72979	14,6771	0,0026266	8,71641	2,8625E-30
2900	43,1578	2,50325	1,38993	14,6985	0,0021133	8,87484	2,8625E-30
3000	41,7253	2,50325	1,7439E-17	14,7054	0,0015264	9,00999	1,1548E-27

Як показують проведені розрахунки збільшення концентрації метану призводить лише до збільшення кількості утвореного вуглецю та водню. Основні рівняння реакцій виглядають наступним чином []:



Як показують термодинамічні розрахунки (рис. 3.11, табл. 3.1), метан розкладається на водень і вуглець, починаючи з температури 600 К. З підвищенням температури вихід вуглецю і водню зростає. Спочатку вуглець осідає у вигляді золи та пірокарбону і діє як відновник. У цій системі молекула Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> стабільна до температури 1500 К. Якщо температура перевищує 1500 К,

утворений з метану вуглець починає відновлювати  $Al_2O_3$  до  $Al$  з утворенням  $CO$ . При температурах понад 2600 К концентрація утворення атомарного водню зростає.

Примітно, що для уникнення інтенсивного утворення золи під час піролізу вуглеводневих газів рекомендується додавати в систему інертний газ (наприклад, азот).

Згідно з оціненими даними (рис. 3.12, табл. 3.2), до температури 1500 К азот істотно не впливає на цільові продукти реакції. Тим не менш, якщо температура перевищує 1500 К, в системі можливе утворення різних азотовмісних сполук з вуглецем і воднем. Додавання іншого інертного газу (аргону) дозволяє уникнути утворення цих сполук. Результати термодинамічних розрахунків (рис. 3.13, табл. 3.3) свідчать про те, що аргон не впливає на хімізм процесу.

За даними термодинамічних розрахунків можна зробити висновок, що оптимальні умови для піровуглецевого покриття при тиску 0,1 МПа реалізуються за температури 900–1500 К і використання аргону як інертного газу.

Подальші дослідження будуть спрямовані на експериментальне вивчення впливу подачі аргону на процес нанесення піровуглецевих покриттів на гранули  $Al_2O_3$  в електротермічному киплячому шарі.

## **3.2 Експериментальні дослідження з режимно-технологічної та апаратурно-конструктивної оптимізації процесу гранулоутворення за золь-гельною технологією**

### **3.2.1 Вплив низькочастотних вимушених коливань на режими коливань крапель у процесі гранулоутворення**

Процес створення гранульованих матеріалів ядерного палива і каталізаторів складається зі:

- 1) стадії приготування вільнодисперсної системи;
- 2) стадії диспергування;

- 3) стадії формування гранул в рідині для затвердіння;
- 4) стадії відведення гранул із рідиною для затвердіння на сепарацію [150];
- 5) стадії формування гранул.

За диспергування рідини через перфоровану оболонку у вібраційному обладнанні (форсунці, диспергаторі, грануляторі) геометричні характеристики отвору [56] для отримання крапель чинять вирішальний вплив для створення нового, більш ефективного грануляційного обладнання і нових гранульованих матеріалів ядерного палива і каталізаторів.

Б. Холіним та В. Склабінським розроблено основи інтенсифікації внутрішніх потоків краплі, що рухається у потоці газу із поперечним градієнтом швидкості. В роботі [65] Скиданенка М. С. та Склабінського В. І. «CFD simulation of ammonium nitrate melt in a perforated rotating bucket» розглянуто дослідження процесу диспергування рідких фаз в перфорованих оболонках [66] з метою створення устаткування для виробництва азотних добрив [67] з їх розплавів.

Експериментом встановлено, що за частоти 240 Гц відбувається розпад струменя з утворенням основної краплі із супутником, що зображено на рисунку 3.15. Середній діаметр супутнику склав  $d_{s0} = 0,92$  мм, що істотно не відрізняється від середнього діаметру краплі  $d_0 = 1,04$  мм. При цьому слід відміти, що на початку цього руху відстань між групами крапель становила  $l_0 = 3,8$  мм.



Рисунок 3.15 - Розпад струменя на краплі при частоті 240 Гц

Після процесу розриву поверхневого зв'язку крапель із супутниками утворюються вторинні сателіти з середнім діаметром, що складає  $\Delta d = 0,19$

мм. Діаметри основних крапель і основного сателіта зменшуються до  $d = 0,94$  мм і  $d_s = 0,84$  мм відповідно, а відстані між ними зменшуються до  $l_0 = 2,1$  мм.

За частоти вимушених коливань 510 Гц можна спостерігати монодисперсний розпад струменя (рис. 3.16).



Рисунок 3.16 - Розпад струменю на краплі за частоти 510 Гц

Аналіз рисунку 3.16 показав, що краплі мають еліпсоїдальну форму із поперемінною зміною малої та великої осей.

При подальшому збільшенні частот відбувається полідисперсний розпад струменів. Збільшення частоти до 800 Гц призвело до струменевого розпорошення із утворенням, при цьому, великої кількості відносно невеликих вторинних сателітів (рис. 3.17).

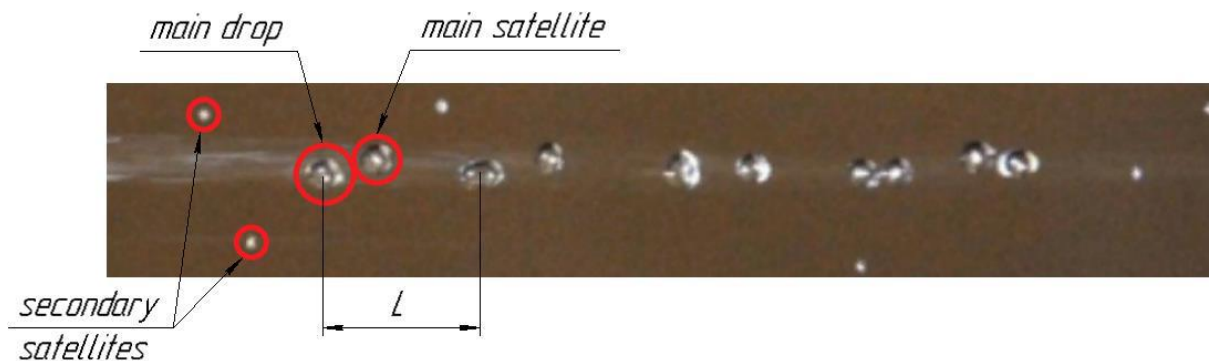


Рисунок 3.17 - Формування вторинного супутника за частоти 800 Гц

У такому випадку середню кількість супутників можна приблизно визначити із закону збереження маси для систем «головна крапля - основний супутник - другорядні супутники».



$$\frac{\pi}{6}(\Delta d^3 n_s + d^3 + d_s^3) = \rho \frac{\pi}{6}(d_0^3 + d_{s0}^3) \quad (3.74)$$

за наступною формулою:

$$n_s = \frac{(d_0^3 - d^3) + (d_{s0}^3 - d_s^3)}{\Delta d^3}. \quad (3.75)$$

Для того, щоб виявити кінематичні характеристики коливань краплі [138], як періодичної зміни її форм від сферичної до еліпсоїдальної із поперемінною зміною її осей у радіальному перетині, що було експериментально досліджено (рис.3.16), застосовано умову збереження маси краплі і деформації із розрахункової схеми, яку представлено на рисунку 3.18. В такому випадку отримуємо:

$$\rho \frac{4}{3} \pi (R + \Delta r)^2 (R + \Delta z) = \rho \frac{4}{3} \pi R^3, \quad (3.76)$$

де  $\rho$  - щільність рідини;

$R$  - радіус краплі у квазірівноважному стані;

$\Delta r$ ,  $\Delta z$  - відхилення радіальної та осьової осей вісесиметричного еліпсоїду відповідно.

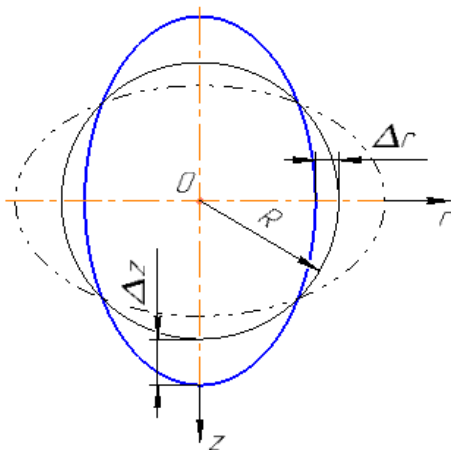


Рисунок 3.18 - Розрахункова схема деформації краплі

Згадані вище твердження щодо поперемінної зміни осей підтверджуються наступною залежністю між параметрами  $\Delta r$  та  $\Delta z$ , що визначаються із рівняння (3.76):

$$z = -\frac{R\Delta r(2R+\Delta r)}{(R+\Delta r)^2}, \quad (3.77)$$

де знак «-» указує на те, що збільшення радіальних розмірів краплі призводить до зменшень її осьових розмірів.

У результаті здійснених експериментальних досліджень виявлено, що у потоці рідини виникають поперечні коливання. У відповідності з цим явищем радіальна швидкість крапель може бути виражена таким чином:

$$zv_r(r, z) = v_{r0}(r) \sin \lambda z, \quad (3.78)$$

де  $v_{r0}(r)$  - невідома функція змін радіальної швидкості;

$\lambda=2\pi/L$  - частотний параметр, що обернено пропорційний довжині хвилі  $L$ .

Рівняння нерозривності використовується з метою отримання аналітичної залежності для складових швидкості, що мають вигляд у циліндричній системі координат:

$$\frac{\partial v_z(r, z)}{\partial z} + \frac{v_r(r, z)}{R+r} + \frac{\partial v_r(r, z)}{\partial r} = 0, \quad (3.79)$$

де  $v_z(r, z)$  - осьова складова швидкості, що можна пов'язати із радіальною за допомогою таких ідентичних перетворень:

$$v_z(r, z) = \frac{dz}{dt} = \frac{dz}{dr} \frac{dr}{dt} = \frac{dz}{dr} v_r(r, z). \quad (3.80)$$

Диференціювання рівняння (3.77) по  $r$  дає змогу отримати такий вираз:

$$\frac{dz}{dr} = -\frac{2R^3}{(R+r)^3} \quad (3.81)$$

згідно з яким рівність (3.80) набирає вигляду:

$$v_z(r, z) = -\frac{2R^3}{(R+r)^3} v_r(r, z). \quad (3.82)$$

Після здійснення ряду перетворень та інтегрування з введенням безрозмірних параметрів (координати  $\bar{r}$ , амплітуди радіальної швидкості  $\bar{v}_{r0}$  та складових швидкості  $\bar{v}_r$ ,  $\bar{v}_z$ ) отримано:

$$\bar{r} = \frac{r}{R} = [-1; 0]; \quad \bar{v}_{r0} = \frac{v_{r0}}{v_{r0}(0)}; \quad \bar{v}_r = \frac{v_r}{v_{r0}(0)}; \quad \bar{v}_z = \frac{v_z}{v_{r0}(0)} \quad (3.83)$$

Безрозмірні складові швидкостей приймають такий вигляд:

$$\bar{v}_r(\bar{r}) = \frac{1}{1+\bar{r}} e^{\frac{\bar{r}(2+\bar{r})}{(1+\bar{r})^2} \lambda R} \sin \lambda z; \quad \bar{v}_z(\bar{r}) = -\frac{2}{(1+\bar{r})^4} e^{\frac{\bar{r}(2+\bar{r})}{(1+\bar{r})^2} \lambda R} \sin \lambda z. \quad (3.84)$$

Отримані вирази для компонент швидкості підтверджено дослідженнями, виконаними раніше Склабінським В.І. та Скиданенко М.С.. Виявлено, що радіальна швидкість у критичному перетині збільшується від осі струменю до поверхні та руйнує струмінь із подальшим утворення краплі. Однак представлений вище підхід дає змогу оцінити критерій, що зберігає монодисперсність одержуваних гранул. Для цього окремо досліджено безрозмірну амплітуду радіальної швидкості:

$$\bar{v}_{r0}(\bar{r}) = \frac{1}{1+\bar{r}} e^{\frac{\bar{r}(2+\bar{r})}{(1+\bar{r})^2} \lambda R}. \quad (3.85)$$

Розклад отриманої залежності в ряд Маклорена по параметру  $\bar{r}$  із урахуванням членів першого порядку дає можливість лінеаризувати вираз для амплітуди радіальної швидкості та, відповідно, отримання дотичної до кривої “ $v_{r0} - \bar{r}$ ”. В такому випадку поблизу поверхні крапель можна записати наступне наближення:

$$\bar{v}_{r0}(\bar{r}) \approx 1 + (2\lambda R - 1)\bar{r}. \quad (3.86)$$

Отриманим виразом показано, що в разі граничних значень  $\lambda_{cr} = 1/(2R)$  параметру  $\lambda$  радіальна швидкість матиме нульовий радіальний градієнт на поверхні крапель. Більше того, у разі  $\lambda < \lambda_{cr}$ , що відповідатиме довжинам хвиль  $L > 4\pi R$ , радіальна швидкість змінить знак всередині краплі. Відповідні граничні значення  $\bar{r}_*$  визначаються з умови екстремуму амплітуди (3.89) і так само

$$\bar{h}_* = -\bar{r}_* = 1 - \frac{1}{\sqrt{n}}, \quad (3.87)$$

де відношення довжин хвилі до її граничних значень вводиться як:

$$n = \frac{L}{L_{cr}} = \frac{2\pi/\lambda}{4\pi R} = \frac{1}{2\lambda R}. \quad (3.88)$$

В результаті цього встановлено, що перевищення безрозмірної радіальної швидкості при значенні  $\bar{v}_{r0} = 1$  відбуватиметься всередині краплі за такого формулювання відстані від її поверхні:

$$\bar{h}_{**} = -\bar{r}_{**} = 1 - \frac{1}{n^\alpha}, \quad (3.89)$$

де  $\alpha$  - параметр, що можна визначити, мінімізувавши загальну квадратичну помилку:

$$R(\alpha) = \sum_{i=1}^N [\alpha \ln n_i + \ln(1 - \bar{r}_{**}^{<i>})]^2 \rightarrow \min; \frac{dR(\alpha)}{d\alpha} = 0, \quad (3.90)$$

де  $\bar{r}_{**}^{<i>}$  - експериментальні точки (рисунок 3.19).

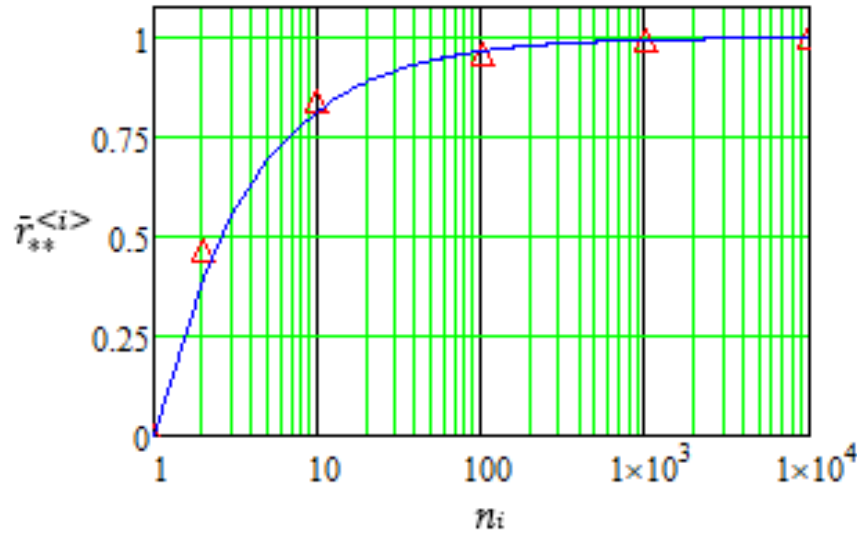


Рисунок 3.19 – Залежність між безрозмірним радіусом  $\bar{r}_{**}$  та відношенням  $n$

Використання формули регресії

$$\alpha = - \frac{\sum \ln n_i \ln(1 - \bar{r}_{**}^{<i>})}{\sum \ln^2 n_i} \quad (3.91)$$

Дає змогу отримання значень  $\alpha = 2/3$ . Тоді формула (3.87) набуде вигляду:

$$\bar{h}_{**} = -\bar{r}_{**} = 1 - \frac{1}{n^{2/3}}. \quad (3.92)$$

В результаті чисельних розрахунків зміну амплітуди розмірної радіальної швидкості для різних довжин хвиль представлено на рисунку 3.20.

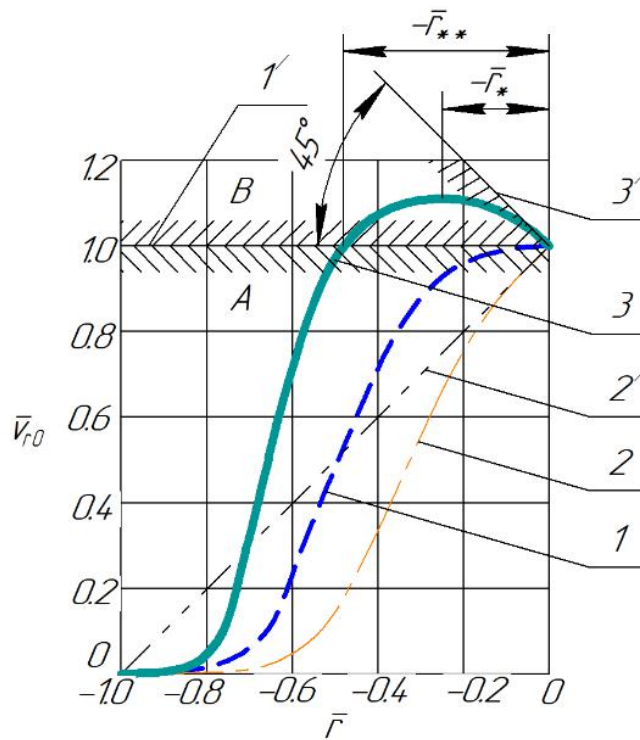


Рисунок 3.20 - Зміна амплітуди радіальної швидкості по радіусу краплі: А, В - зона постійного та змінного знаку градієнту радіальної швидкості; 1-3 - криві амплітуди променевої швидкості; 1/-3/- - дотичні до радіальної швидкості на поверхні краплі

Додатково діапазон зміни діаметру головного супутника можна визначити із рівняння збереження маси:

$$d_s = \sqrt[3]{1 - \left(2 - \frac{1}{n^\alpha}\right)^3} d \quad (3.93)$$

Отримані аналітично залежності підтверджується їх порівнянням із експериментальними даними. Експериментально встановлено, що для частот  $f = 240$  Гц розпад струменю супроводжується утворенням основної краплі з середнім діаметром  $d = 1.04$  мм. Відстань між основними краплями  $l = 3,8$  мм (рис. 3.15). В такому випадку хвильовий параметр  $\lambda = 2\pi/l = 1653$  м<sup>-1</sup>. Його критичні значення  $\lambda_{cr} = 1/d = 962$  м<sup>-1</sup> відповідають довжині хвилі  $l_{cr} = 6.5$  мм. Значення  $n = \lambda_{cr} / \lambda = 0,582$  дають можливість оцінки діаметру супутника у

діапазоні 0,91-0,97 мм. Його середні значення  $d_s = 0,94$  мм узгоджуються із вищезазначеними експериментальними значеннями 0,92 мм.

Аналогічно і для частоти коливань  $f = 510$  Гц (рис. 3.16) діаметри основної краплі та супутника рівні  $d = 0,94$  мм та  $d_s = 0,84$  мм відповідно. При цьому діапазон діаметру сателіта 0,78-0,84 мм дає можливість оцінити середні значення 0,81 мм.

Слід зазначити, що відносна похибка становить менше 4%.

### **3.2.2 Витікання через отвір при стисканні струменя з урахуванням нахилу отвору та циркуляції перед отвором**

Метою даного експерименту було визначення коефіцієнту витрати  $M$  для різних значень числа Рейнольдса  $Re$  (або для висот стовпа рідини у стакані) за різних умов витікання.

Коефіцієнт витрати  $\mu$  можна представити:

$$\mu = \frac{Q_d}{Q_t}, \quad (3.94)$$

де  $Q_d$  – дійсні витрати через отвір;

$Q_t$  – теоретична витрата через отвір.

Дійсну витрату можна визначити об'ємним способом. Знаючи обсяг мірного бачка –  $W$  та термін його наповнення  $t$ , є можливість визначити витрату рідини через отвір:

$$Q_d = \frac{W}{t} \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{сек}} \quad (3.95)$$

де  $W$  – об'єм мірного бачка, л;

$t$  – час наповнення мірного бачка, с;

Теоретична витрата визначається по формулі:

$$Q = M_T \cdot F_o \cdot \sqrt{2gH} \quad (3.96)$$

де  $\mu_T$  – теоретичний коефіцієнт витрати, що, за відсутності втрат, дорівнює 1;

$F_o$  – площа отвору, м<sup>2</sup>;

$H$  – висота стовпа рідини над затверджувачем, м;

У дослідженнях із циркуляцією загальноприйняті критерії витікань не підходять. Якщо число Рейнольдса передбачалося визначати за формулою:

$$R_e = \frac{v_{ub} \cdot d}{\nu} \quad (3.97)$$

то невідомо, як визначити теоретичні витрати, а саме: яку підставити площу  $F_o$  у формулу визначення теоретичної витрати. Якщо за  $F_o$  умовно прийняти площу отвору, тоді при високих циркуляціях, коли витрати через отвір наблизатимуться до нуля, коефіцієнт витрат прагнучиме нескінченності, бо величина теоретичної витрати лишатиметься кінцевою величиною (при  $H > 0$ ). Таким завданням  $F_o$  не характеризуватиметься течія. Очевидно, в якості площі  $F_o$  слід приймати кільцеву площу, що утворена стінками отворів і поверхні вихору. Тоді зі збільшенням циркуляції діаметр вихору повинен збільшуватися, а кільцева площа зменшуватиметься. Цим буде зменшено як дійсну витрату, так і теоретичну, а коефіцієнт витрати завжди лишатиметься кінцевою величиною.

Слід указати, що визначити діаметр вихору у площині отвору нескладно, коли вирішено задачу щодо визначення циркуляції у склянці.

Для цього необхідно знайдено значення, а потім, знаючи циркуляцію, визначено радіус вихору за формулою:



$$\tau_B = \frac{\Gamma}{2\pi \cdot V_{ub}} \quad (3.98)$$

Циркуляцію визначено за формулою, число Рейнольдса:

$$R_e = \frac{V_{ub} \cdot d}{\nu} \quad (3.99)$$

де:

$$V_{ub} \cdot d = \frac{\Gamma}{\pi d} \quad (3.100)$$

Дійсна витрата:

$$Q_T = F_o \sqrt{2gH}, \quad (3.101)$$

де

$$F_o = \frac{\pi}{4} (d^2 - d_B^2) \quad (3.102)$$

$$d_B = \frac{\Gamma}{\pi \cdot V_{ub}} \quad (3.103)$$

Коефіцієнт витрати:

$$\mu = \frac{Q_D}{Q_T} \quad (3.104)$$

З метою отримання результатів, що є зручними для практичного застосування, розраховано поправочні коефіцієнти, що необхідно вводити для уточнень коефіцієнтів витрати  $\mu$ . Ці коефіцієнти є відношенням коефіцієнту витрати, отриманого дослідним шляхом, до коефіцієнту витрати:

$$K\alpha = \frac{\mu_o}{\mu_r} \quad (3.105)$$

Графіки побудовано для різних кутів  $\alpha^\circ$  (кут нахилу площини отворів до горизонту) і різних відношень  $d/D$  (рис. 3.26 - 3.28).

Результати експериментальних досліджень представлено на рисунках 3.22-3.25. Аналіз отриманих результатів показав, що не перебіг відбувається за порівняно малих чисел Рейнольдса, що, як відомо, дасть велику невизначеність коефіцієнту  $\mu$ . Графік зміни коефіцієнта  $\mu$  у залежності від  $Re$  матиме такий вигляд (рис. 3.21):

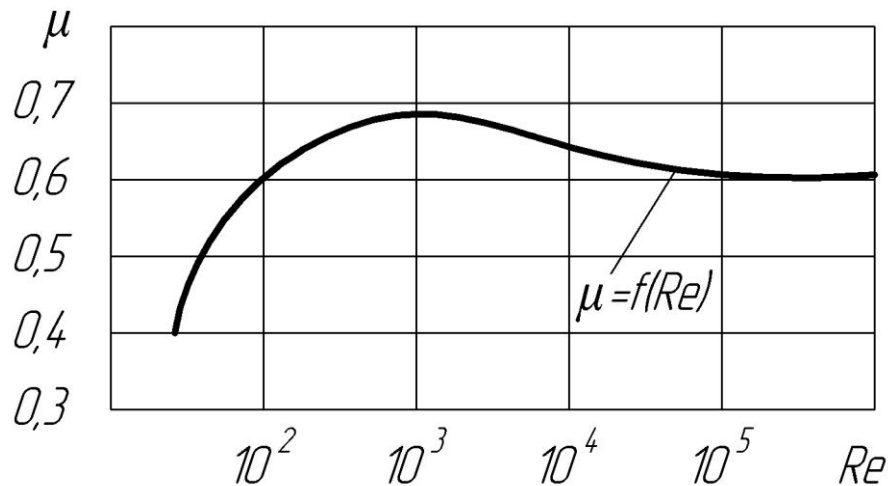


Рисунок 3.21 – Графічна залежність коефіцієнту витрати  $\mu$  від критерію  $Re$

Видно, що коефіцієнт витрати  $\mu$  майже не змінюється при  $Re > 10^5$ . При  $Re < 10^5$  коефіцієнт  $\mu$  матиме складну залежність та визначатиметься за різними рекомендаціями.

Дослідами встановлено, що наявність циркуляції у склянці (навіть незначної) суттєво позначається на витіканні, що показано в таблиці 1 (додаток А) за другий етап НДР, в якій приведено дійсні значення витрат при закінченні із циркуляцією і без неї при інших умовах.

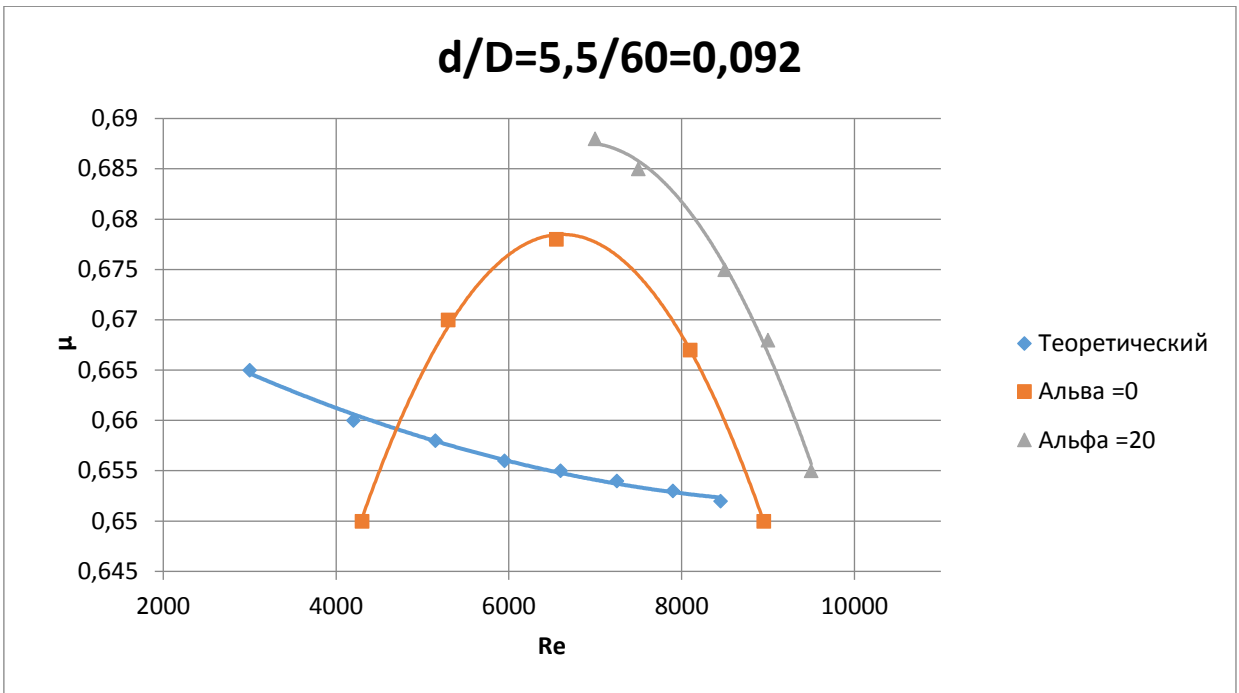


Рисунок 3.22 – Залежність коефіцієнтів витрат рідини (золю)  $\mu$  через отвір від критерію  $Re$  ( $2000 < Re < 11000$ ), при співвідношенні  $d/D=5,5/60=0,092$

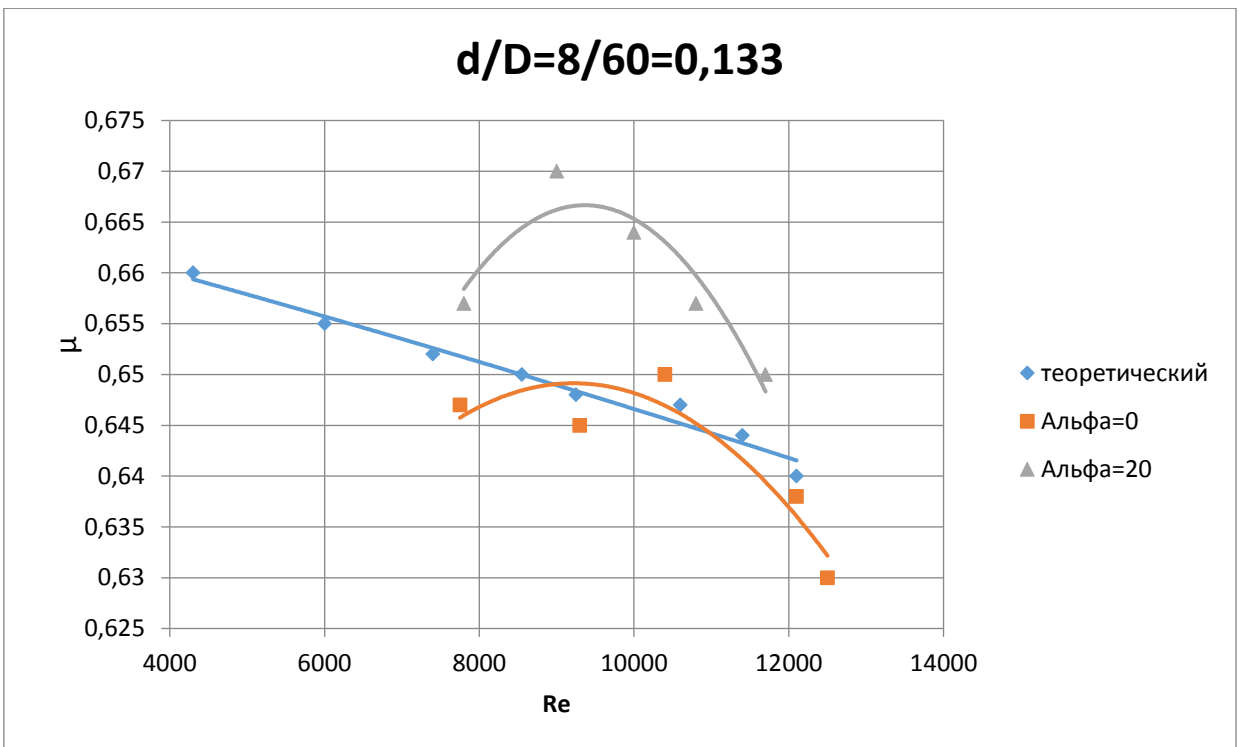


Рисунок 3.23 – Залежність коефіцієнтів витрати рідини (золю)  $\mu$  через отвір від критерію  $Re$  ( $4000 < Re < 13000$ ), при співвідношенні  $d/D=8/60=0,133$

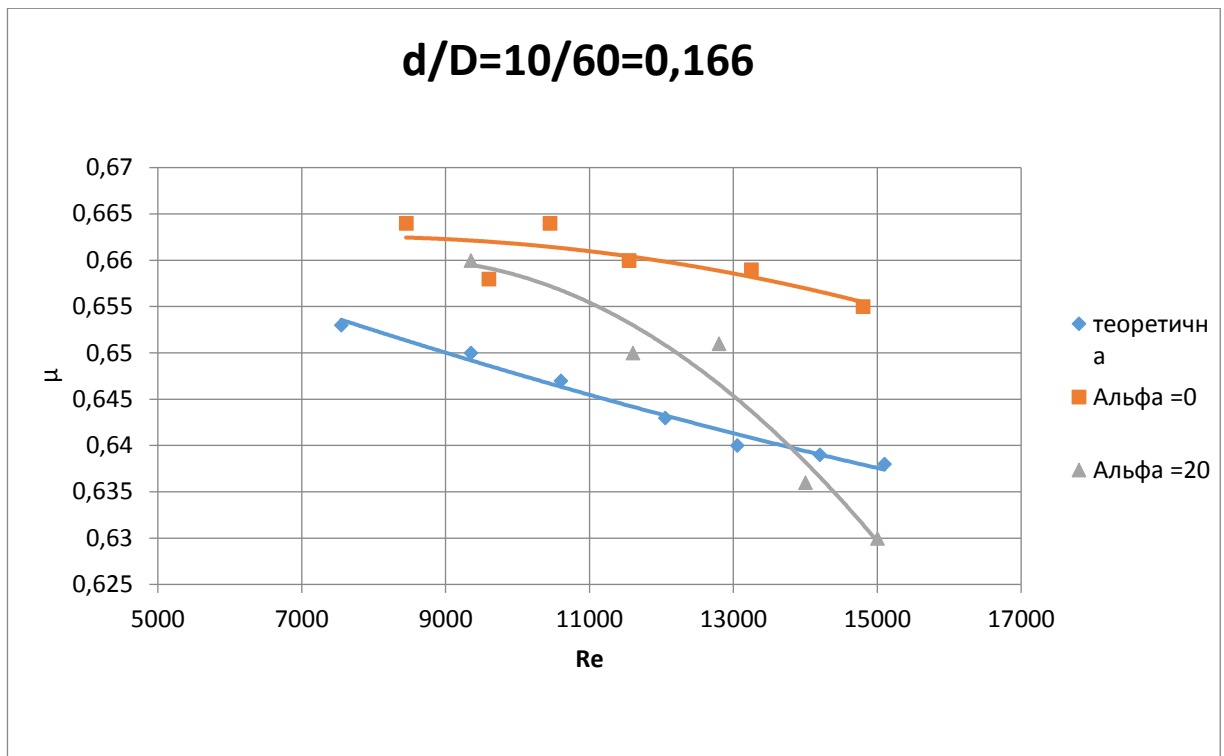


Рисунок 3.24 – Залежність коефіцієнтів витрати рідини (золу)  $\mu$  через отвір від критерію  $Re$  ( $5000 < Re < 17000$ ), при співвідношенні  $d/D=10/60=0,166$

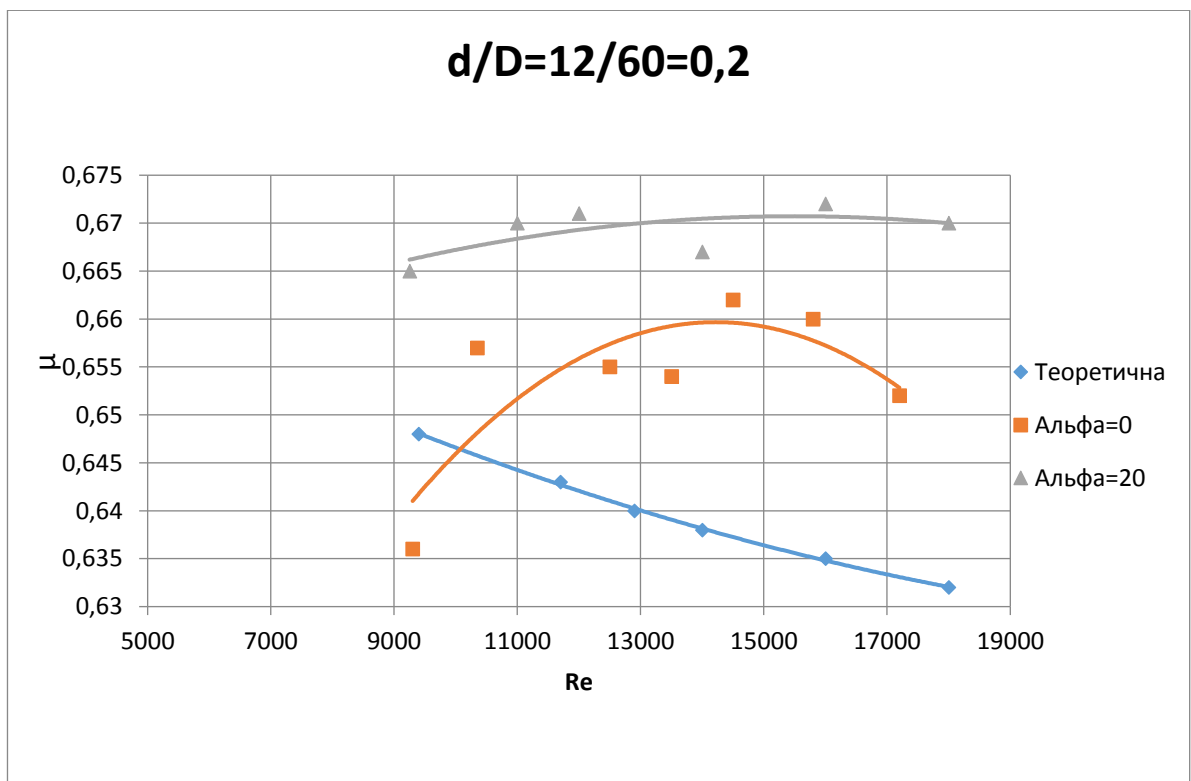


Рисунок 3.25 – Залежність коефіцієнтів витрати рідини (золу)  $\mu$  через отвір від критерію  $Re$  ( $9000 < Re < 19000$ ), при співвідношенні  $d/D=12/60=0,2$

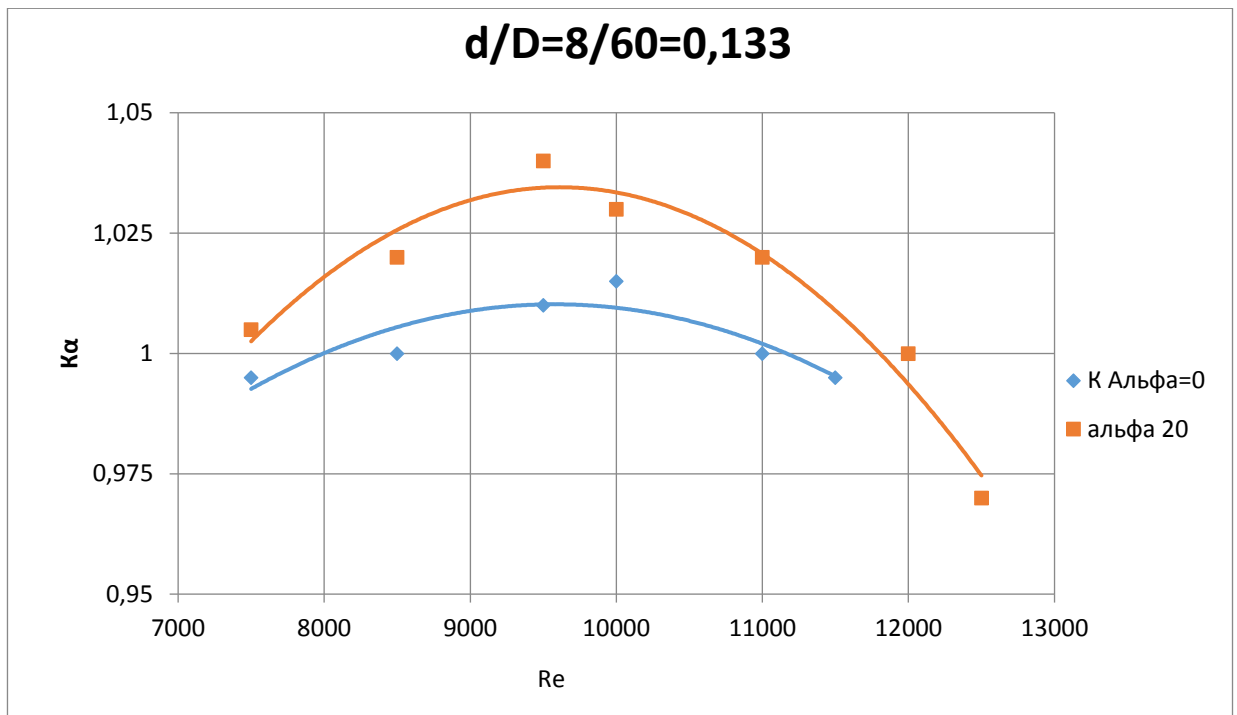


Рисунок 3.26 – Залежність коефіцієнтів витрати рідини (золу)  $\mu$  через отвір від критерію  $Re$  ( $7000 < Re < 13000$ ), при співвідношенні  $d/D=8/60=0,133$

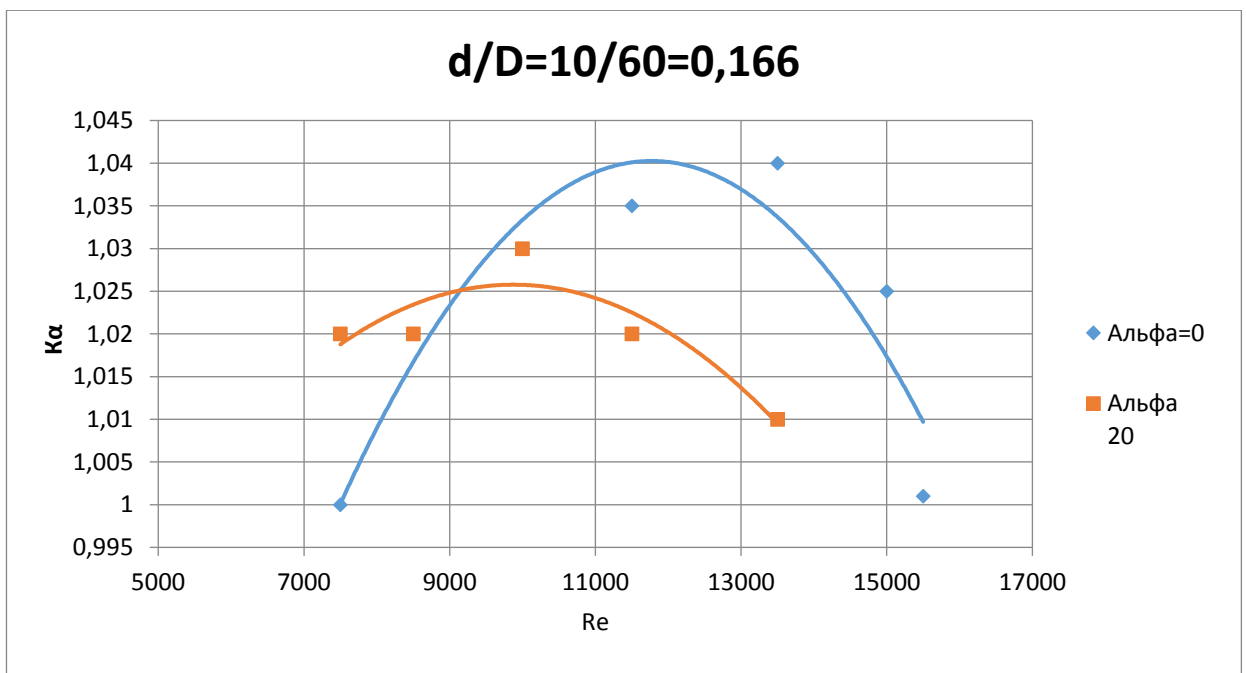


Рисунок 3.27 – Залежність поправочних коефіцієнтів  $K\alpha$  від критерію  $Re$  ( $7000 < Re < 17000$ ), при співвідношенні  $d/D=10/60=0,166$

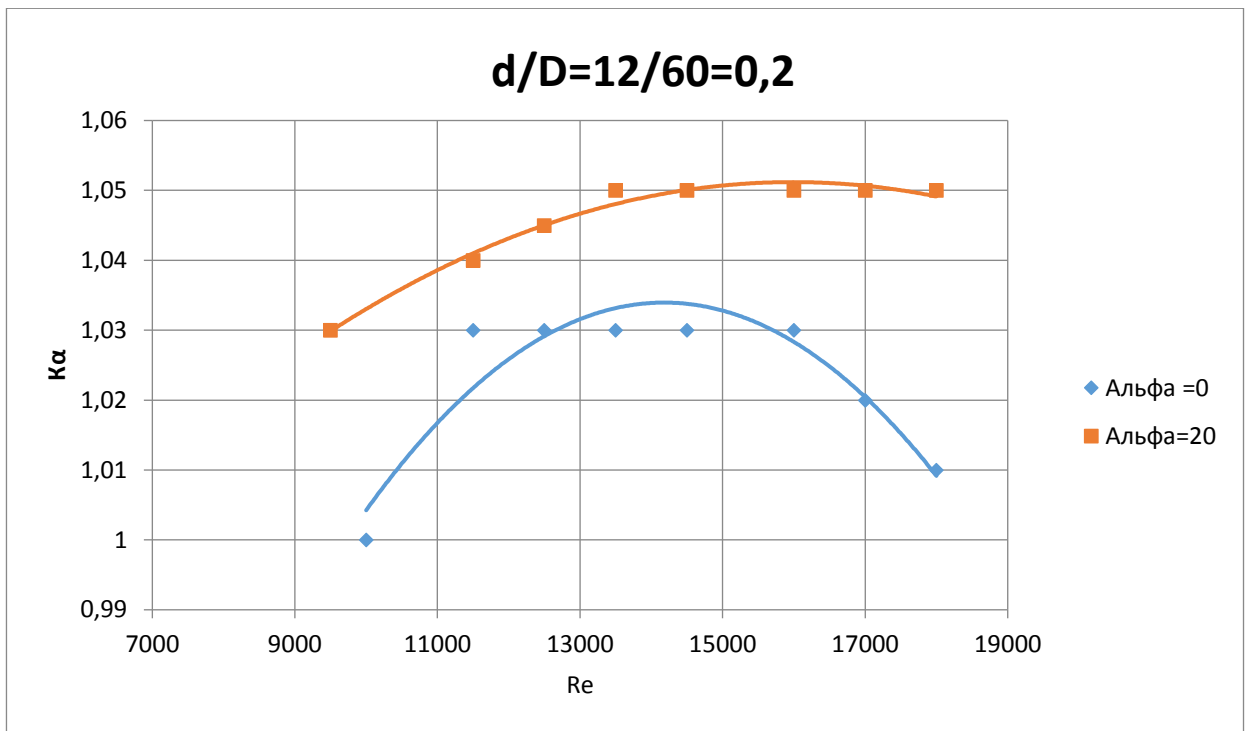


Рисунок 3.28 – Залежність поправочних коефіцієнтів  $K_\alpha$  від критерію  $Re$  ( $9000 < Re < 19000$ ), при співвідношенні  $d/D=12/60=0,2$

Отримані результати досліджень викладено у статті [140], де описано методику проведення фізичних експериментів щодо процесу диспергування рідини, що дозволяє оцінити вплив гідродинамічних та конструктивні параметрів обладнання за фізико-механічними властивостями отриманих гранул каталізатора  $Al_2O_3$ . В роботі указано, що для експериментальних досліджень розроблено установку для виготовлення каталізатора  $Al_2O_3$  та для дослідження процесу витoku рідини із отворів також розроблено пристрій та запропоновано конструкцію пульсаційної шайби. В роботі представлено основні результати досліджень, проведених протягом тривалого часу, що можна вважати однією з ключових публікацій стосовно усієї роботи.

Крім того, у роботах [141-143] показано моделювання течії у вихровій камері рідина–пара, а також режимів роботи гранулятора у виробництві карбамід гранул.

### 3.2.2 Дослідження залежності швидкості переміщення частинок в змійовику промивача

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

В дослідженні застосовано як рідину, що промиває, – воду, а в ролі частинок, які промиваються, – пісок із середніми розмірами частинок  $d_p = 2,58 \cdot 10^{-4}$  м. У результаті обробки отриманої інформації, отримано графічну залежність по середній швидкості переміщення частинок в змійовику від частоти переміщень діафрагми пульсатора (рис. 3.29).

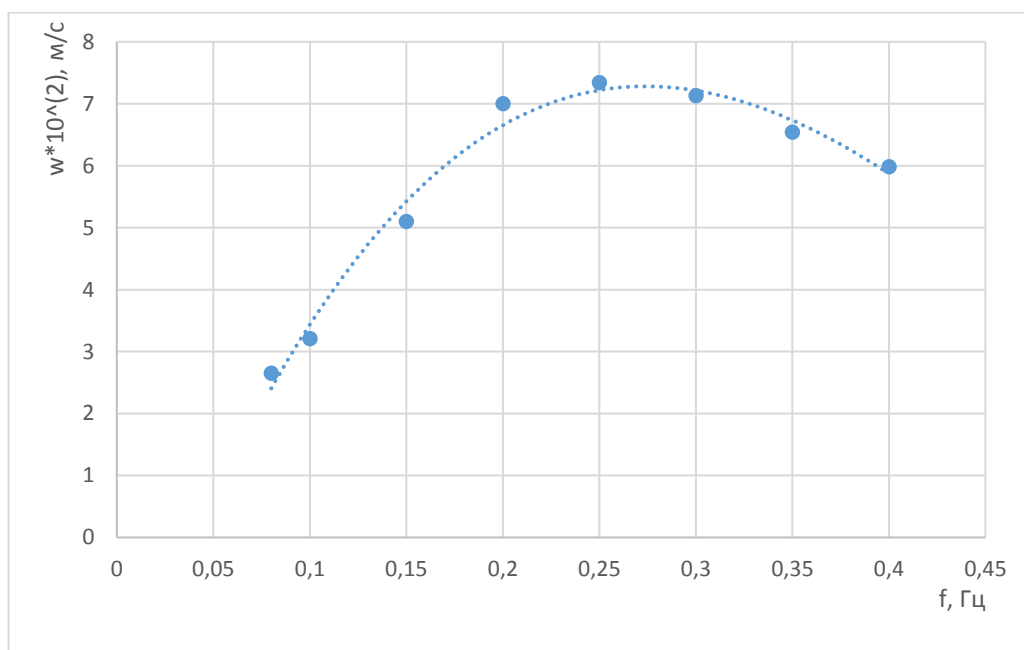


Рисунок 3.29 - Графік залежності середньої швидкості переміщення гель-сфер в змійовику промивача від частоти переміщення діафрагми пульсатора

З графіку видно, що за збільшення частоти до деякого зі значень, відбуватиметься зростання середньої швидкості руху частинок по змійовику, а при подальшому збільшенні частоти, відбуватиметься зменшення швидкості руху частинок. Пояснити це можна тим, що за зворотного ходу діафрагми пульсатора відбувається зворотний знос гранули на деяку відстань.

Таким чином, у залежності від частоти переміщення діафрагми пульсатора, промивач працюватиме у двох режимах: режимі переміщення

гранул та режимі інтенсивного перемішування. Для часток, що схильні до злипання, можна рекомендувати режим інтенсивного перемішування.

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

В результаті отриманих дослідних даних побудовано графічну залежність по середній швидкості переміщення частинок в змійовику та амплітуді переміщення діафрагми (рис 3.30).

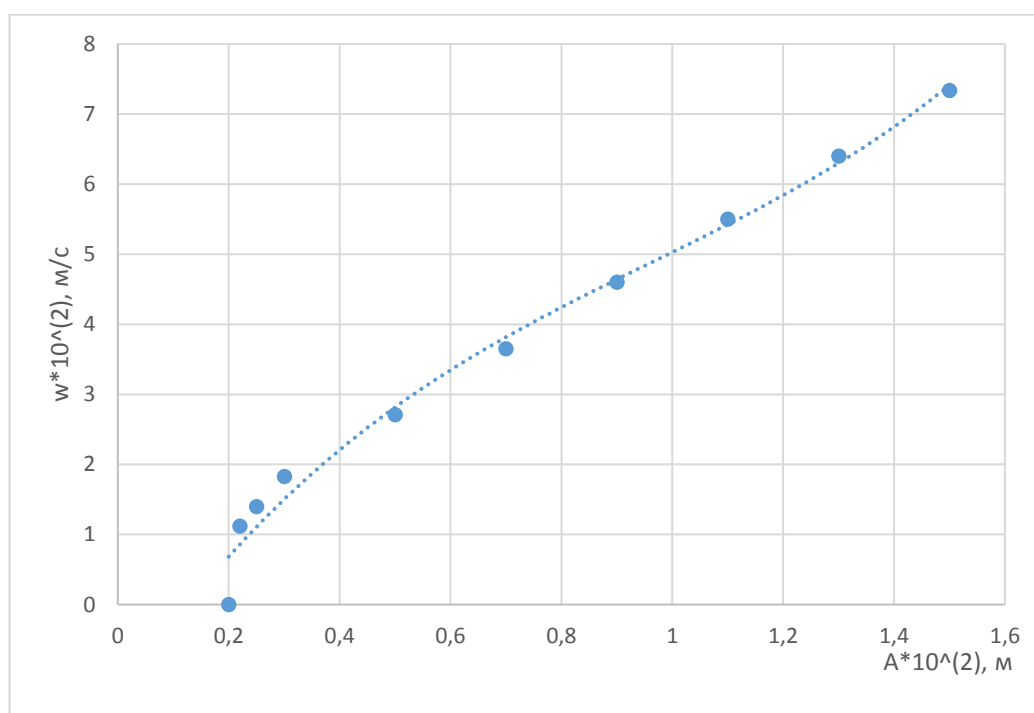


Рисунок 3.30 - Графік залежності середньої швидкості переміщення гель-сфер в змійовику промивача від амплітуди переміщення діафрагми пульсатора

З графіку видно, що при збільшенні амплітуди швидкість переміщень частинок лінійно зростатиме.

Однак, за малих амплітуд переміщення діафрагми пульсатора (у даному випадку, 2 мм) спостерігатиметься різке зменшення швидкості руху в частинок та забивання змійовика частинками. Пояснити це можна тим, що гідроімпульси з малою інтенсивністю демпфуються повітрям, рідиною, що знаходяться в замкнених порожнинах. А тому, амплітуда по переміщенню



діафрагми пульсатору має бути певної мінімальної величини, що залежить від розміру пульсатору.

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

У результаті обробки дослідних даних отримано залежність середньої швидкості переміщень частинок в змійовику по відношенню до середнього діаметру змійовика (рис. 3.31).

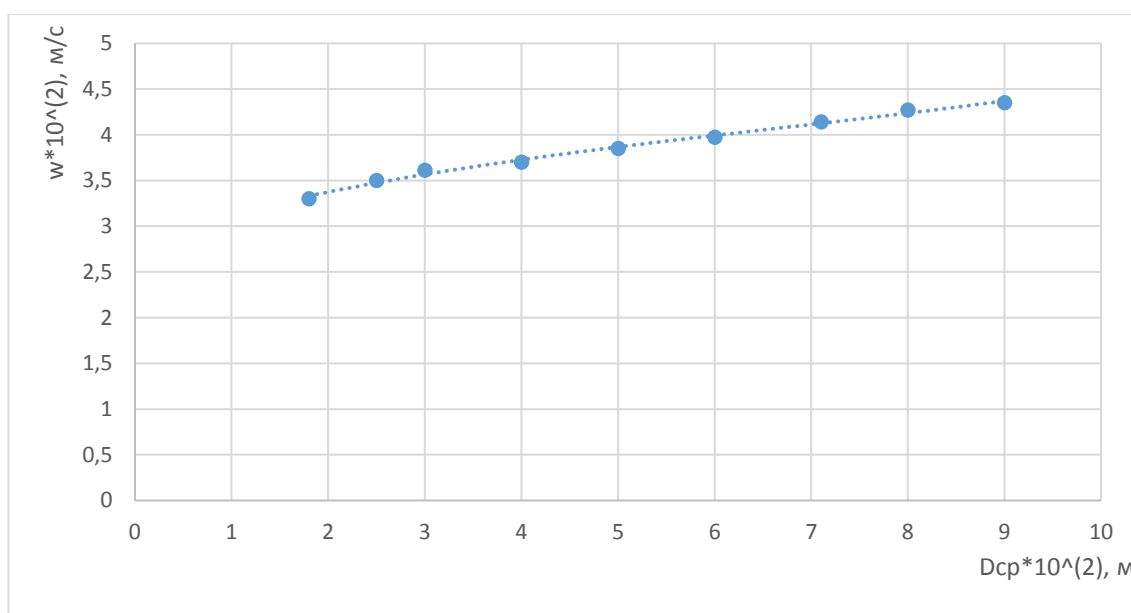


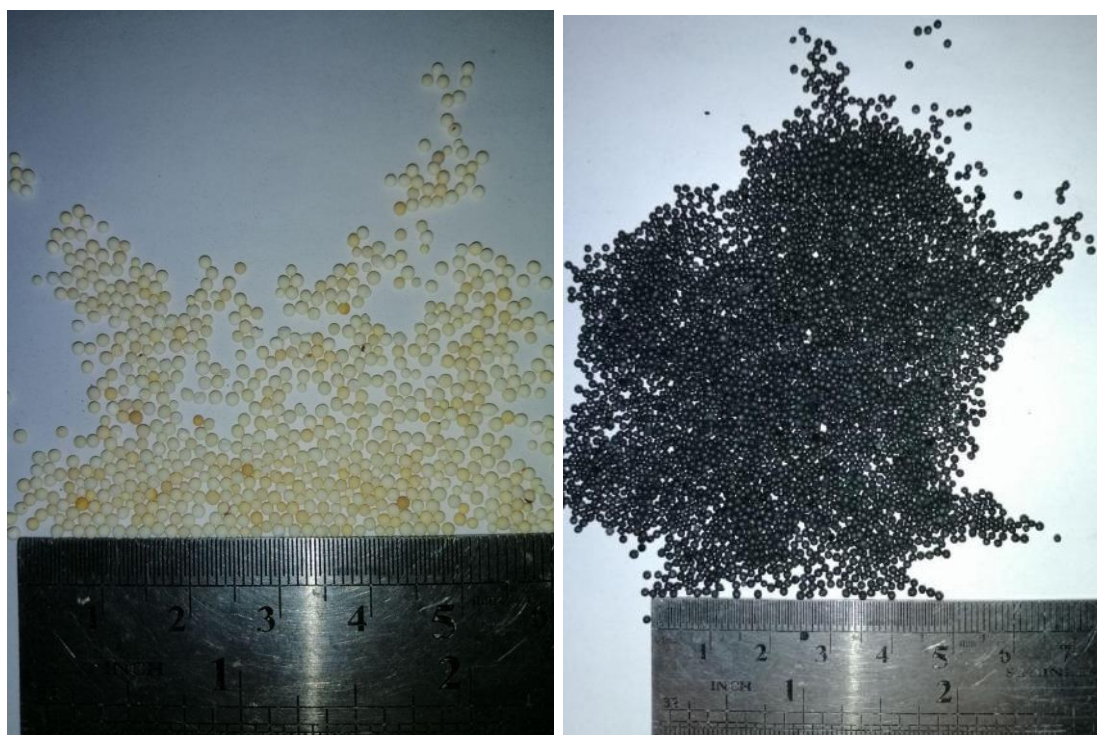
Рисунок 3.31 - Графік залежності середньої швидкості переміщення гелісфер в змійовику промивача від середнього діаметра змійовика

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

Під час досліджень встановлено, що середня швидкість з переміщення частинок залежала від ступеню заповнення змійовика. Однак, за значень  $K_3 > 0,4$  спостерігалось відставання нижнього шару частинок від верхнього. Тому, рекомендовано проводити промивання за ступенів заповнення, що є меншими 0,4.

### 3.2.3 Результати експериментальних досліджень з піровуглецевого покриття

У результаті проведених експериментальних досліджень вдалося нанести шар піровуглецевого покриття на модель мікросферичного ядерного палива (гранульований  $Al_2O_3$ ) (рис. 3.32). Вміст піровуглецю: 8 %мас.



а

б

Рисунок 3.32 - Гранульований  $Al_2O_3$  : а- вихідний, б- покритий піровуглецем.

На рис. 3.32 видно, що пірокарбон щільно покриває поверхню гранул  $Al_2O_3$ . Цей факт свідчить про достатню якість піровуглецевого покриття на гранулах і відкриває перспективу впровадження галькових ТВЕЛів в енергетичних реакторах.

Порівняння необроблених і оброблених поверхонь гранульованого  $Al_2O_3$  представлено на рис. 3.33.



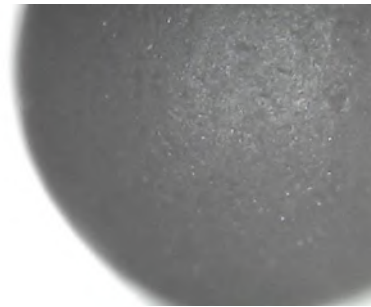
а



б



в



г

Рисунок 3.33 - Поверхні необроблених (а, в) та оброблених (б, г) гранул: а, б –  $\times 400$ ; в, г –  $\times 1600$

Результати тепловізійних досліджень процесу піролізу наведено на рисунку 3.34.

Згідно з даними тепловізійної зйомки, найбільш значні втрати тепла відбуваються через верхню частину реактора біля виходу газу.

Розрахунки піролізу метану для нанесення піровуглецевого покриття на гранульований  $Al_2O_3$  для різних співвідношень  $Al_2O_3 : CH_4$  представлені в пункті 3.1.5.

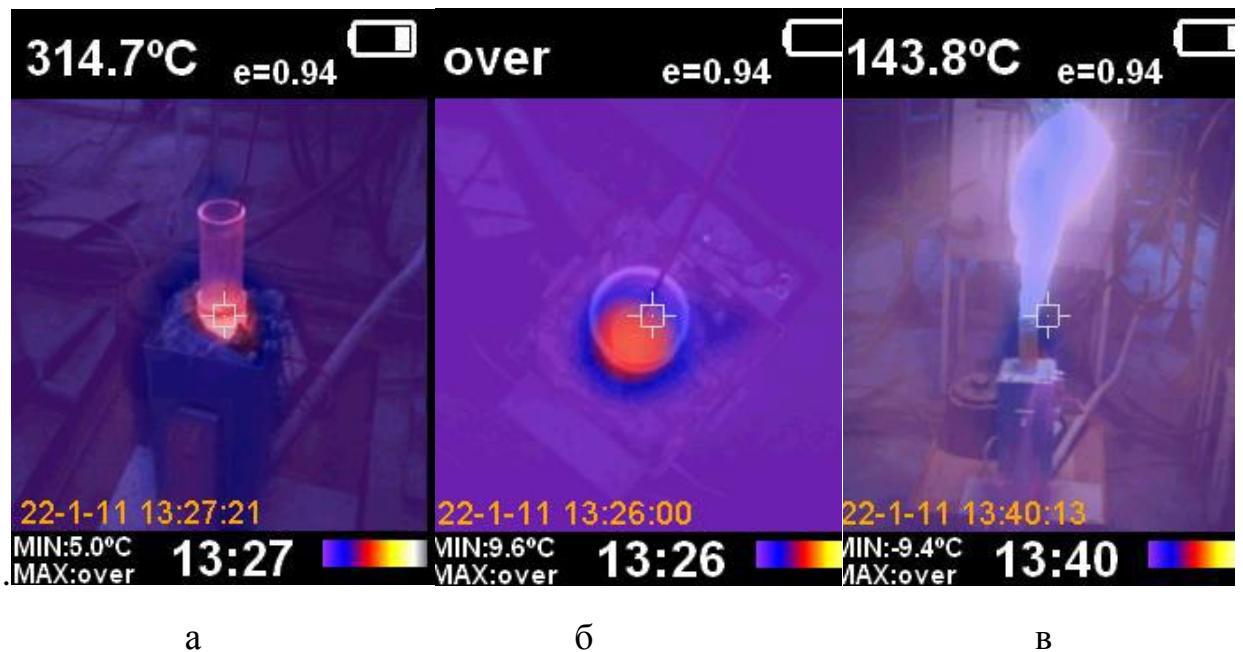


Рисунок 3.34 - Тепловізійне дослідження нагрівання установки для подачі чистого азоту (а, б) та суміші природного газу та азоту (в): а, в – вид збоку; б – вид зверху

### 3.3 Висновки до третього розділу

1. Аналіз результатів числових моделювань показав, що найбільші деформації корпусу гранулятора мають місце під диском, та складають 70 мкм. Після розкладання коливань на елементарні (гармонічні) складові для визначення амплітуди та частоти коливань з'ясовано, що коливання нижньої частини перфорованого днища гранулятора складаються з двох гармонічних коливань 230 Гц та 520 Гц, які відрізняються практично в два рази.

2. За результатами модального аналізу корпусу гранулятора визначено, що перша частота вільних коливань 205 Гц, а друга 380 Гц, третя – 450 Гц, четверта – 550 Гц, а характер коливань пояснює несиметричність деформацій середньої частини перфорованого днища корзини.

3. Для доведення математичної моделі до прийнятного рівня адекватності необхідно проводити фізичний експеримент, за результатами якого необхідно будувати амплітудно-частотну характеристику коливань днища.

4. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження процесу розпаду струменя рідини на краплі, який є одним з основних процесів при

вібраційному диспергуванні (гранулюванні). В результаті були виявлені режими коливань краплі для різних частот. Показово, що на відносно низьких частотах відбувається загасання струменя з утворенням основної краплі разом з супутником приблизно такого ж розміру. Виявлено, що зі збільшенням частоти вібрації зв'язок між краплею і супутником порушується. Це призводить до утворення ряду порівняно невеликих вторинних супутників. В цьому випадку діаметри крапель і відстань між основними краплями також зменшуються.

5. Розроблена уточнена математична модель деформацій краплі, яка враховує експериментально задані режими [78]. Дана модель засновується як на законі збереження маси, так і на рівнянні нерозривності потоку. В результаті рішення рівнянь математичної моделі отримані аналітичні залежності для компонент швидкості. Модель дозволяє теоретично обґрунтувати зміну знака градієнта радіальної швидкості, як причину розпаду струменя на краплі при вібраційному впливі, а також отримати аналітичні залежності для визначення діаметра і загального числа супутників.

6. В результаті визначення умов стійкості і характеристик розпаду вісесиметричної форми краплі було встановлено, що існує кілька режимів, які залежать від частотних характеристик коливального впливу. Зокрема, в першому режимі амплітуда радіальної швидкості збільшується від нуля в центрі краплі до максимального значення на поверхні. Цей режим відповідає відносно низьким частотам коливань. Він реалізується, коли довжина хвилі дорівнює критичного значення, отриманого аналітично. У другому режимі амплітуда радіальної швидкості всередині краплі перевищує критичне значення і досягає максимального значення на деякій відстані від поверхні, на якій градієнт радіальної швидкості змінює знак. Цей режим виникає на відносно високих частотах коливань. Він супроводжується струменевим розпиленням з утворенням великої кількості відносно невеликих вторинних супутників.

7. Достовірність отриманих результатів за математичною моделлю підтверджується відповідністю аналітично отриманого середнього діаметра сателітів певному експериментальному значенню для різних частот вібраційного впливу. При цьому відносна похибка отриманих результатів не перевищує 4% [79].

8. Розроблена математична модель нестационарного розпаду крапель. Ця модель враховує вплив об'ємних і поверхневих сил на відносне зміщення краплі, що розпадається. Результати моделювання дозволили отримати залежність для визначення критичного розміру краплі і визначити необхідну частоту коливань. Додатково було отримано критичний діаметр нестабільних крапель і розрахована залежність часу руйнування. Ці дані дозволили аналітично визначити критичне значення числа Вебера. Крім того, залежність між числами Онезорг, Лапласа і Рейнольдса була отримана аналітично і доведена експериментально. Зокрема, для діаметрів крапель в діапазоні 1,6-2,6 мм числа Рейнольдса і Онезорг знаходяться в діапазоні  $Re = (3,1-7,2) \cdot 10^3$  і  $Oh = (0,35-0,81) \cdot 10^{-3}$  відповідно. Достовірність отриманих результатів підтверджується тим, що критичне значення числа Вебера  $We_{cr} = 5,9$  знаходиться в діапазоні  $We_{cr} = 4-20$ , отриманому експериментально попередніми дослідниками Д. Пажі і В. Галустовим, а також узгодженістю між певним критичним розміром крапель 1,98 мм, що розпадаються, і експериментально отриманим діапазоном діаметрів 1,90-2,05 мм для крапель, які розпадаються на частоті вимушених коливань 240 Гц. При цьому відносна похибка отриманих результатів становить близько 4% [80].

9. Наголошується, що результати математичної моделі можуть бути використані при розробці відповідних технологій і методик створення вібраційних грануляторів (диспергаторів) для отримання монодисперсних крапель і гранул. Крім того, запропонована математична модель може бути використана для визначення умов забезпечення надійності газодинамічного устаткування для поділу газорідних систем.

10. 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 та має відмінні особливості: теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість інтенсифікації масообмінних процесів за рахунок збільшення градієнта швидкості потоку газу; запропоновано загальну залежність, яка враховує нелінійний розподіл швидкості разом з радіусом крапель; досліджено вплив внутрішніх циркуляційних потоків в краплині на стабільність її руху в вихровому потоці газу.

11. Обґрунтовано фізико-математичні моделі руху рідкого краплинного струменя в газовому потоці з точки зору впливу градієнта швидкості на циркуляційні потоки в крапельці. Отримані результати дозволяють сформулювати основи підвищення ефективності масообмінних процесів і продуктивності грануляційного та масообмінного обладнання. Ці результати також дозволяють вибрати умови експлуатації і забезпечити найбільш перспективну технологію реалізації правильної організації газо-рідких потоків в масообмінних апаратах.

12. Аналіз руху частинок з урахуванням сили Басе дозволив отримати модифіковане рівняння руху частинок, які рухаються з різною швидкістю в часі. В результаті рішення рівняння отримана аналітична залежність дробового порядку для визначення швидкості осадження частинок. Це рівняння відрізняється від традиційного половинною похідною швидкості частинки.

13. В результаті інтеграції запропонованого рівняння його загальне рішення знайдено аналітично. Це рішення відрізняється від традиційного компонентом на основі модифікованої функції Міттаг-Лефлера. Для конкретного випадку нульової сили Басе це рівняння зводиться до

традиційного. Теоретично була доведена приналежність цього рішення до реального діапазону значень.

14. 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.

15. Графічно 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 сидементації частинок доведена аналітично і чисельно.

16. Показано, що сила Басе значно збільшує час осадження. У випадку, якщо сила Басе не розглядається, то час осадження дорівнює 3,0. При врахуванні сили Басе з безрозмірним параметром, рівним 0,05, цей час збільшується на 43%.

17. 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. 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.

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



19. Дослідження фізико-механічних властивостей гранул діоксиду 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 діоксиду алюмінію монодисперсні з діаметром 1,6 мм.

20. У результаті досліджень щодо впливу концентрації азотної кислоти показано, що при співвідношенні складу «порошок – кислота» як 1,05 : 2,0 досягається максимальна величина міцності отриманої гранули (1,8 кг/гран).

21. Рекомендації щодо визначення коефіцієнта витрати  $\mu$  дають розбіжність із результатами проведених експериментів, особливо за малих числах Рейнольдса ( $Re < 10^5$ ). Для більш точного визначення коефіцієнта  $\mu$  доцільно користуватися поправочним коефіцієнтом  $K_a$ . Значення коефіцієнта  $\mu$  для різних  $d_o/D_i$  та  $d$  були визначені в ході фізичних експериментів, та представлені на рисунках 3.22-3. 28.

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

23. У результаті фізичного моделювання процесів, що протікають у змійовиковому пульсаційному промивачі, визначені залежність швидкості руху гель-сфер від частоти переміщення діафрагми пульсатора, амплітуди переміщення діафрагми пульсатора, середнього діаметра змійовика та ступеня заповнення змійовика гранулами.

24. У результаті досліджень 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 гелісфер 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.

25. 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.

26. 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  $K_z < 0.4$ .

27. У результаті термодинамічних розрахунків визначено основні теплофізичні параметри нанесення захисного піровуглецевого покриття на  $Al_2O_3$ , який брали в якості моделі мікросферичного ядерного палива, для випадку електротермічного киплячого шару за температури процесу 900–1500 К і тиску 0,1 МПа.

28. Експериментально доведено можливість нанесення піровуглецевого покриття на гранули  $Al_2O_3$ , які слугували у якості моделі ядерного палива. При цьому під час піролізу в реакторі з електротермічним псевдозрідженим шаром з вуглеводню виділяється пірокарбон при температурі в шарі в діапазоні 1073–1273 К.

29. Експериментально доведено, що пірокарбонова плівка рівномірно покриває всю поверхню гранул. Цей факт підтверджує технологічні умови виробництва ядерного палива.

30. Термодинамічними розрахунками доведена необхідність додавання в реактор інертного газу (азоту або аргону). Цей газ значно зменшує процес золоутворення, а отже, зменшує забруднення навколишнього середовища.

## **4 АПРОБАЦІЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ**

### **4.1 Спосіб отримання гранульованого каталізатора та ядерного палива за золь-гельною технологією**

На основі одержаних теоретичних та експериментальних результатів та проведеного аналізу відомих способів [93, 146] було розроблено спосіб отримання гранульованих матеріалів з вільнодисперсних систем та установка для його здійснення. Взаємозв'язана група винаходів відноситься до галузі хімічної технології та хімічного машинобудування, зокрема до способу та обладнання з виробництва гранульованих матеріалів з вільнодисперсних систем, і може бути використаною при виготовленні носіїв каталізаторів, сфер ядерного палива.

Першою задачею винаходу поставлено удосконалення способу отримання гранульованих матеріалів з вільнодисперсних систем при гранулюванні в рідину, шляхом зміни умов формування крапель на стадії їх дозування та гідродинамічних параметрів руху рідини для затвердіння на стадії формування гранул, що дасть змогу поліпшити монодисперсність крапель та умови їх розподілу на поверхні рідини для затвердіння, запобігти потраплянню крапель одна на одну та їх злиттю на поверхні розподілу фаз крапля вільнодисперсної системи → рідина для затвердіння.

Другою задачею винаходу поставлено задачу удосконалення установки для отримання гранульованих матеріалів з вільнодисперсних систем шляхом зміни її конструктивних елементів, що дозволить, поліпшити гідродинамічні характеристики руху рідини для затвердіння в колоні, поліпшити механізм гранулоутворення та підвищити монодисперсність крапель (гранул).

Перша поставлена задача вирішується тим, що в способі для отримання гранульованих матеріалів з вільнодисперсних систем, що включає стадію приготування вільнодисперсної системи, стадію дозування її краплями, стадію формування гранул у рідині для затвердіння, стадію відведення гранул

з рідиною для затвердіння на сепарацію з наступним відведенням рідини для затвердіння на стадію формування гранул. Запропоновано на стадії дозування, утворення крапель відбувається завдяки вібрації вільнодисперсної системи, а на стадії формування гранул входження крапель вільнодисперсної системи здійснюється в поверхневий шар рідини для затвердіння, яка має обертальний рух відносно свого центра.

Передача вібрації з безпосереднім накладанням вібрації на матеріал вільнодисперсної системи на стадії дозування запобігає виникненню не робочих частот гармонік, які впливають на процес утворення крапель, і, як результат, підвищується монодисперсність крапель (гранул).

Завдяки організації обертового руху рідини для затвердіння відносно свого центру кожна наступна крапля вільнодисперсної системи потрапляє на поверхню розподілу фаз газ  $\rightarrow$  рідина на відстані від попередньої краплі.

Процес утворення крапель вільнодисперсної системи на стадії дозування та перехід їх на стадію формування гранул пояснюється на рис.4.1, де схематично зображено механізм отримання гранул. На вільнодисперсну систему передається вібрація та формуються краплі діаметром  $d_{кр}$  з частотою  $f$  (частота вібраційного пристрою). Крапля за час  $T$  проходить відстань  $L_1$  від сопла дозуючого пристрою до поверхневого шару рідини для затвердіння. За цей час, попередня крапля, завдяки обертовій швидкості рідини для затвердіння  $V_{об}$  проходить відстань  $L_2$ .  $L_2$  – це відстань між попередньою та наступною краплею, які досягли поверхневого шару рідини для затвердіння.

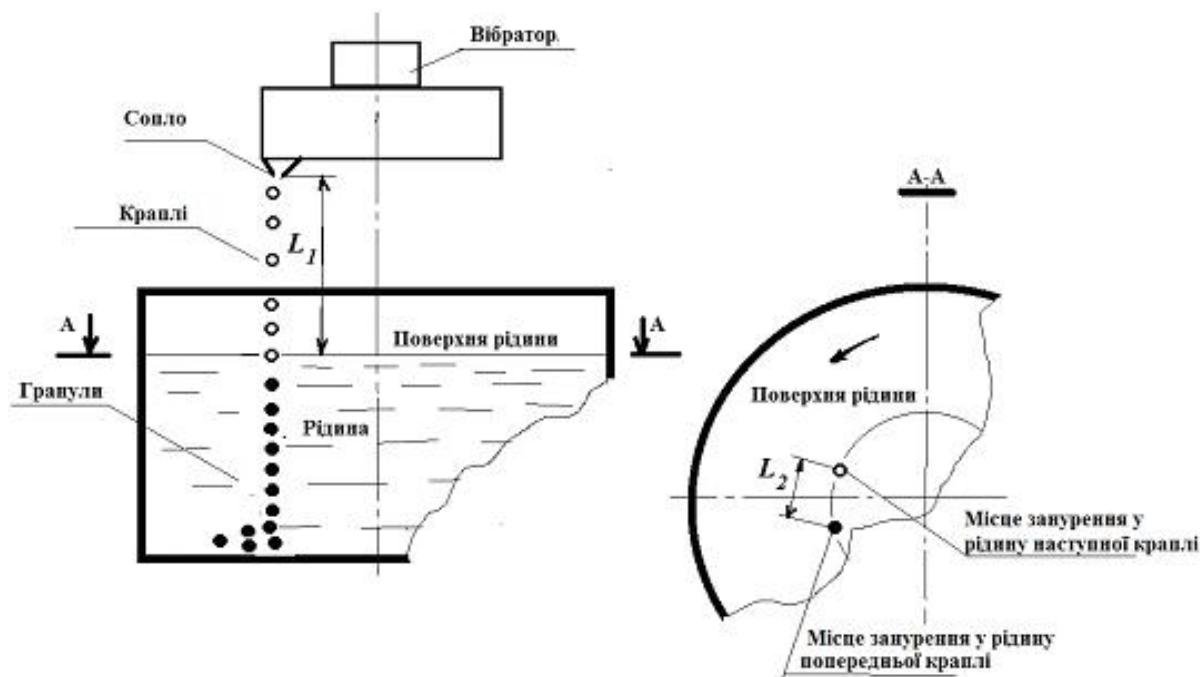


Рисунок 4.1 - Схема розробленого нового масообмінного апарату

Таким чином, обертовий рух рідини для затвердіння сприяє тому, що кожна наступна крапля потрапляє на поверхневий шар рідини для затвердіння на відстані від попередньої краплі, за рахунок цього, краплі уникають зіткнення та злиття.

Крім того, обертовий рух рідини для затвердіння прискорює надходження крапель на стадію формування гранул у рідину для затвердіння, завдяки виникненню додаткової до горизонтальної складової швидкості руху крапель ще й окружної складової швидкості.

Друга поставлена задача вирішується тим, що в установці для отримання гранульованих матеріалів з вільнодисперсних систем, встановлюємо вібраційний пристрій на трубопроводі перед дозуючим пристроєм або на дозуючому пристрої, а вхідний отвір для подачі рідини для затвердіння в колону виконаний в циліндричному розподілювачі, що встановлений в верхній частині колони, та складається з коаксіально розмішених зовнішньої та внутрішньої оболонок, і на внутрішній оболонці, по всій її боковій поверхні,

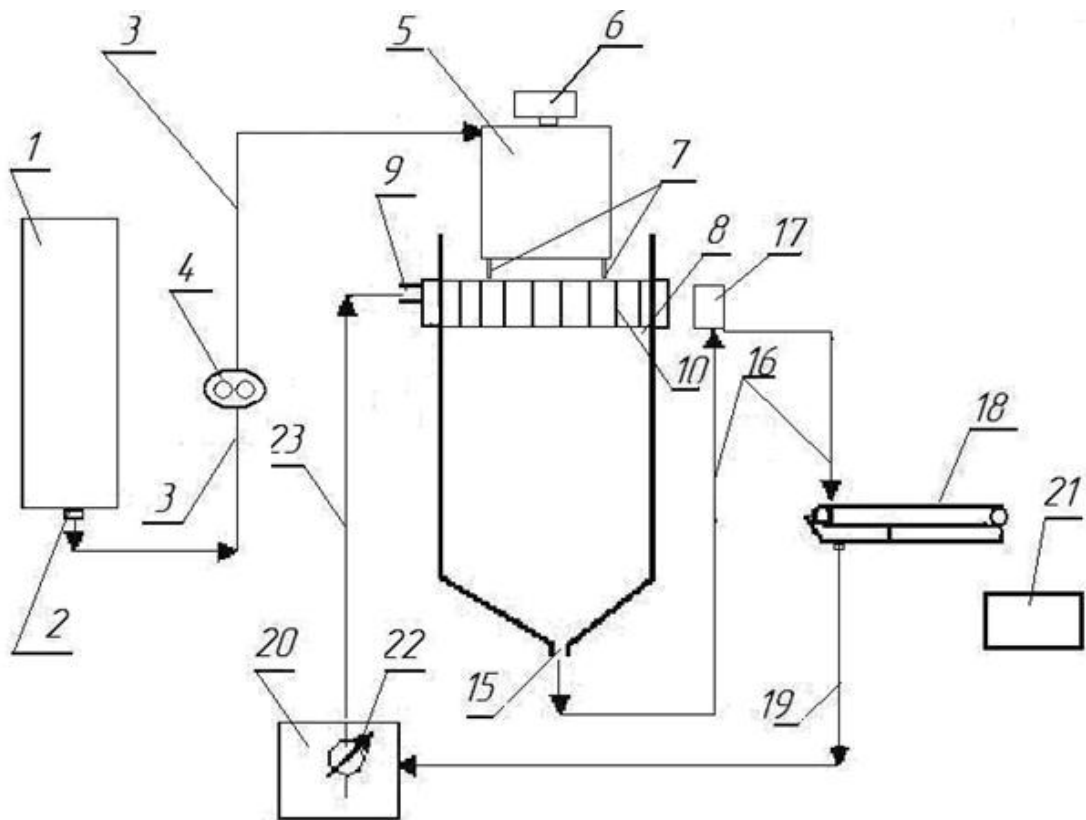
виконані вертикальні прорізи з направляючими лопатями, встановленими під кутом від  $5^{\circ}$  до  $30^{\circ}$  до бокової поверхні внутрішньої оболонки.

Завдяки тому, що рідина для затвердіння подається під тиском в колону через циліндричний розподілювач, в якому вона спочатку потрапляє між зовнішньою та внутрішньою оболонками. Потім через вертикальні прорізи, взаємодіючи з направляючими лопатями, забезпечується її обертальний рух відносно дозуючого пристрою з соплами, при цьому краплі потрапляють на поверхню розподілу фаз газ  $\rightarrow$  рідина на відстані одна від одної, що унеможливорює попадання крапель одна на одну, і, відповідно, їх злиття та дроблення, що призводить до підвищення монодисперсності гранулометричного складу гранул.

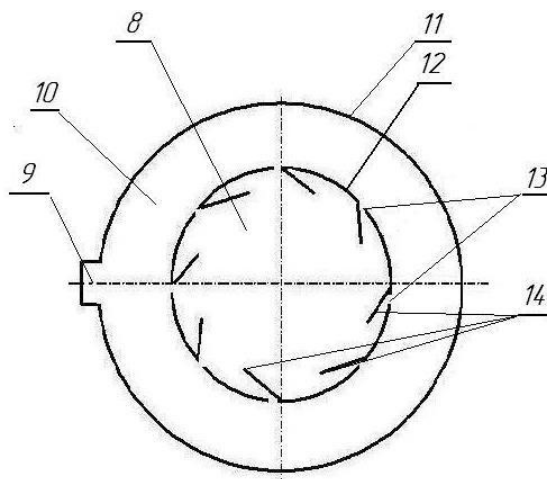
Окрім цього, встановлення вібраційного пристрою на трубопроводі подачі вільнодисперсної системи до дозуючого пристрою або на нерухомому дозуючому пристрою дає можливість передавати вібрацію на матеріал вільнодисперсної системи без послаблення амплітуди та виникнення додаткових гармонік коливання. Це пояснюється тим, що при передачі вібрації в системі вібраційний пристрій – вільнодисперсна система відсутні пристрої (механізми), завдяки яким можуть виникати додаткові гармоніки не робочих частот вібрацій та спотворюватися параметри робочої частоти вібрації та її амплітуди.

Нижче наведено варіант використання розробленого способу при виробництві носіїв каталізаторів.

Суть розробленої установки пояснюється кресленнями, де на рис. 4.2 а схематично зображений загальний вигляд установки, на рис. 4.2 б схематично зображений варіант виконання циліндричного розподілювача.



а



б

Рисунок 4.2 – Установки виробництва носіїв каталізаторів: а) технологічна схема; б) циліндричний розподільвач: 1 – реактор для приготування вільнодисперсної системи; 2, 9, 15 – патрубки; 3, 16, 19, 23 – трубопровід; 4 – насос; 5 – дозуючий пристрій; 6 – вібраційний пристрій; 7 – сопла; 8 – колона; 10 – розподільвач; 11 – зовнішня циліндрична оболонка; 12 – внутрішня циліндрична оболонка; 13 – вертикальні прорізи; 14 – направляючі лопаті; 17 – переливний засіб; 18 – сепаратора; 20 – ємкість; 21 – бункер; 22 – насос.



Установка працює наступним чином.

В реактор для приготування вільнодисперсної системи 1 подають порошок гідроксиду оксиду алюмінію ( $\text{AlOOH}$ ) в кількості 0,2285 масових частин, азотну кислоту, в кількості 0,0240 масових частин (в перерахунку на 100%  $\text{HNO}_3$ ) та воду – останнє, де їх змішують на протягом 30 хвилин.

Після цього отриману вільнодисперсну систему подають через штуцер 2 по трубопроводу 3 до насоса 4 та до дозуючого пристрою 5.

Вібраційний пристрій 6, який встановлений на трубопроводі 3 або безпосередньо на дозуючому пристрою 5, накладає вібрацію на потік вільнодисперсної системи частотою 60 Гц.

Вільнодисперсна система надходить до дозуючого пристрою 5 і через сопла 7 діаметром 0,001 м у вигляді крапель з швидкістю витікання 0,4 м/с витікає через сопла до колони 8. Завдяки вібраційному пристрою 6 краплі мають однаковий розмір. При таких умовах формуються краплі, діаметр яких  $d_{кр} = 1,9 \times 10^{-3}$  м, падають на поверхневий шар рідини для затвердіння стадії формування гранул в колону 8.

В якості рідини для затвердіння в колоні 8 використовують аміачну воду концентрацією 15%  $\text{NH}_3$  в кількості 0,003 м<sup>3</sup>/с, що подають з тиском через патрубок 9, що знаходиться на зовнішній циліндричній оболонці 11 циліндричного розподільника 10. З патрубка 9 рідина надходить у простір між зовнішньою циліндричною оболонкою 11 та внутрішньою циліндричною оболонкою 12 та через прорізи 13 внутрішньої циліндричної оболонки 12 та завдяки направляючим лопатям 14 отримує обертальний рух потрапляючи в колону 8, що забезпечує швидкість обертання поверхні рідини для затвердіння  $V_{об} = 0,5$  м/с.

Завдяки обертальному руху рідини для затвердіння краплі вільнодисперсної системи з сопел 7 дозуючого пристрою 5 потрапляють на поверхню рідини на відстані одна від одної. Відстань між краплями на поверхні рідини для затвердіння становить  $6 \times 10^{-3}$  м. Проходячи колону 8 краплі вільнодисперсної системи вступають у взаємодію з рідиною для

затвердіння та перетворюються в гранули. Час формування гранул в колоні становить 15 с.

Гранули з рідиною для затвердіння через вихідний отвір 15, що знаходиться в нижній частині колони 8, по трубопроводу 16 надходять до пристрою 17. За допомогою висоти розміщення цього пристрою регулюється надходження гранул з рідиною до сепаратора 18, в якому відбувається розподіл потоку на рідину для затвердіння та гранули. Рідина для затвердіння по трубопроводу 19 надходить до ємності 20, з якої насосом 22 по трубопроводу 23 знову подається до патрубку 9 колони 8.

Гранули з сепаратора 18 поступають до ємності 21.

Сформовані гранули разом з аміачною водою з стадії формування гранул безперервно відводяться на стадію відведення гранул, де відбувається розподіл на гранули та аміачну воду, яка повертається на стадію формування гранул. Ступінь монодисперсності гранул продукту діаметром 1,8-2,0 мм становить понад 98 %.

На дану розробку подано заявку на винахід.

#### **4.2 Спосіб отримання піровуглецю і покриття ним каталізатора та ядерного палива**

В основу для аналізу отриманих результатів в експериментальних та теоретичних дослідженнях з метою одержання піровуглецю і покриття ним дисперсної фази (пункти 3.1.5 та 3.2.3), покладено здійснення вдосконалення способу його одержання і покриття ним дисперсної фази.

Новизна способу полягає в нагріванні реакційної суміші і охолодженні готового продукту, здійснюючи у кілька стадій, у яких, крім першої, у ролі вихідного дисперсного матеріалу використовується подрібнений продукт з попередньої стадії, а уже нагрівання реакційних сумішей здійснюється шляхом пропускань через псевдозріджені шари електричного струму.

Тому, вихідний матеріал в вигляді дрібнодисперсного природного графіту завантажуються у реакційну зону реактору із електротермічним

псевдозрідженим шаром і з метою створення псевдозрідженого шару подається суміш пропан-бутану і азоту. По створеному псевдозрідженому шару пропускається електричний струм, унаслідок чого реакційну суміш нагрівають до температури 950 °С, а це спричинятиме розкладення вуглеводню із утворенням піровуглецю і водню. В першій стадії способу він здійснюється протягом 40 хвилин, а після цього продукт вивантажується в холодильник. Варто відмітити, що вміст піровуглецю у дисперсному матеріалі становить 40-70 мас. %.

В другій стадії у реакційну зону реактору із електротермічним псевдозрідженим шаром завантажується подрібнений продукт з першої стадії та здійснюється процес за температури 950 °С і протягом уже тоді 40 хв. Вміст піровуглецю у дисперсному матеріалі складатиме 71-75 мас. %.

На третій стадії в реакційну зону реактора із електротермічним псевдозрідженим шаром завантажується подрібнений продукт другої стадії та здійснюється процес за температурі 950 °С протягом 40 хв. При цьому, вміст піровуглецю у дисперсному матеріалі складатиме 76-85 мас. %.

На четвертій стадії в реакційну зону реактору по електротермічному псевдозрідженому шару завантажується подрібнений продукт третьої стадії і здійснюється процес за температури 950 °С там протягом 40 хв. Вміст піровуглецю дисперсного матеріалу складає 87-94 мас. %.

На п'ятій стадії в реакційну зону реактора завантажують подрібнений продукт четвертої стадії і здійснюють процес за температурі 950 °С протягом 40 хв. Тоді, вміст піровуглецю дисперсного матеріалу становитиме 95-97 мас. %.

Варто відмітити, що процес по одержанню піровуглецю можна завершити на будь-якій зі стадій в залежності від вимог щодо чистоти готового продукту. За проведення процесу в 5 стадій питома енерговитрата становить 37 кВт·год. для 1 кг готового продукту. В порівнянні із найближчим аналогом, - збільшення виходу піровуглецю відбувається на 20-30 % і зменшення питомих енерговитрат ще приблизно на 20 %.

В результаті вище сказаного, пропонується спосіб з одержання піровуглецю забезпечуватиме можливість по одержанню піровуглецю із високим вмістом піровуглецю у вихідному дисперсному матеріалі й підвищення енергоефективності даного процесу.

На даний спосіб отримано документ захисту авторського права у вигляді патенту на корисну модель [107].

### **4.3 Спосіб отримання пірографіту з низьким виходом аморфного вуглецю**

Основою аналізу з отриманих результатів експериментальних і теоретичних досліджень встановлено новий спосіб одержання пірографіту з низьким виходом аморфного вуглецю.

Пірографіт може бути застосованим у техніці з надвисокими температурами, атомній енергетиці, машинобудуванні, а також в електротехніці, авіа - і ракетобудуванні.

Розробленим і вдосконаленим способом отримується зменшення кількості в утвореного аморфного вуглецю унаслідок рівномірних нагрівань реакційної зони за використання псевдозрідженого шару і відсутність галогенів у реакційній зоні. Виключається можливість по утворенню токсичних сполук, а так як теплота генерується безпосередньо у реакційній зоні, то і зменшуватимуться питомі енергетичні витрати.

Спосіб з одержання пірографіту проводиться за таким алгоритмом. Вихідний матеріал в вигляді дрібнодисперсного чистого графіту завантажуватимуть у реакційну зону реактору з електротермічними псевдозрідженими шарами, для створення псевдозріджених шарів подають суміш метану чи пропан-бутану і інертного газу. Шляхом уже пропускань електричного струму через псевдозріджені шари його нагріватимуть до температури 1900 °С, а це спричинюватиме розкладення вуглеводню із осадженням пірографіту і утворенням водню. Вихідні матеріали витримують протягом трьох годин, а після чого вивантажуватимуть у холодильник, де і

відбуватиметься процес охолодження. При цьому, частка пірографіту становить 40 мас. %, частка аморфного вуглецю складатиме 60 мас. %, а питомі енерговитрати 43 кВт год/кг. В газі, що відходить, відсутні сполуки водню із галогенами.

Є декілька температурних режимів для отримання пірографіту, а результати показників занесені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняння температурних характеристик

Показник	1	2	3	4
Температура, °С	1900	2300	2700	3000
Частка пірографіту, мас. %	40	55	75	90
Питомі енерговитрати, кВт год./кг	43	38	30	26

З таблиці видно, найбільша частка в пірографіту і найменші питомі енерговитрати за температури 2700-3000 °С. Це забезпечується компенсуванням часу для нагрівання високою температурою. Нагрівання уже вище 3000 °С викликатиме технологічні складності. В запропонованому способі реально підвищити температуру більше, ніж 2000 °С.

На даний спосіб отримано документ захисту авторського права у вигляді патенту на корисну модель [108].

#### **4.4 Впровадження і перспективи використання отриманих науково-технічних результатів**

Узагальнення результату роботи над створенням нових гранульованих матеріалів для ядерного палива та каталізаторів в активному гідродинамічному середовищі було представлено в монографії [149]. В якій описано сучасні методи масообміну у вихрових газокраплинних потоках та підходи до раціонального проектування вихрових апаратів. Представлені розробки інноваційних конструкцій масообмінного обладнання. На основі експериментальних досліджень і практичного досвіду запропоновано методи

оцінки гідравлічних і масообмінних характеристик. Монографія використовується при підготовці студентів за напрям підготовки 133 - галузеве машинобудування зі спеціалізації, з освітньої програми «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів (акт впровадження в додатках).

Під час виконання НДР було проведено теоретичні та експериментальні дослідження режимів впливу різних частот вимушених коливань на струмені та краплі на основі аналізу, яких було розроблено підсилювач вібратора та власну прогресивну технологію їх виробництва, які використовуються для отримання монодисперсного продукту. Результати розробки були спочатку впроваджені під час ремонту та модернізації підсилювача вібратора типу ТЕСН 999005.029 для ПАТ «ЧеркасиАзот» (договір №839-413). Під час експлуатації обладнання було отримано гарні результати за гранулометричним складом продукту, фракція 1-4 мм становила не менше 98 мас. %, що дозволило продовжити співпрацю з підприємством у вигляді нового замовлення на розробку на виготовлення підсилювача вібратора (договір №401-411).

Узагальнення результатів теоретичних та експериментальних досліджень гідродинамічних характеристик завихрення потоку рідини в середині гранулятора (диспергатора) дозволило поліпшити механізм гранулоутворення та підвищити монодисперсність крапель (гранул). Було впроваджено під час виготовлення за власною прогресивною технологією корзини до вібраційного статичного гранулятора моделі PS 39 грануляційної установки, замовником виступав ПАТ «РівнеАзот» (договір №369). Результати експлуатації показали можливість отримувати гранулометричний склад продукції у заданому вузькому діапазоні, що являється наслідком використання коректної математичної моделі отриманої під час досліджень.

Отримані наукові результати та практичні рекомендації представляють високу науково-практичну цінність, мають перспективи до впровадження при проектуванні та виготовленні високоефективного енергозберігаючого

грануляційного обладнання та були використані при наданні науково-консультаційних послуг на підставі дилерської угоди між Сумським державним університетом та ТОВ «НПО УКРХІММАШ» від 20.04.2021 р.

Виконавці НДР доповіли про основні отримані результати з грануляції оксидів важких металів за золь-гельною технологією з піровуглецевим покриттям на IV Міжнародній конференції «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику», яка пройшла в Інституті газу НАН України, м. Київ з метою розгляду проблем та перспектив, підвищення рівня ефективності науково-практичних досліджень у сфері атомної енергетики та атомно-промислового комплексу, функціонуванню та підвищенню безпеки АЕС (у т.ч. під час російської агресії). Між Сумським державним університетом та Інститутом газу Національної академії наук України підписано договір про співробітництво (договір №1102-2021м/0015 від 08.06.2021 року).

#### **4.5 Висновки до четвертого розділу**

1. На основі одержаних теоретичних та експериментальних результатів розроблені способи отримання гранульованих матеріалів з вільнодисперсних систем та установка для його здійснення.

2. Запропоновані зміни умов формування крапель на стадії їх дозування та гідродинамічних параметрів руху рідини для затвердіння на стадії формування гранул, що дає змогу поліпшити монодисперсність крапель та умови їх розподілу на поверхні рідини для затвердіння, запобігти потраплянню крапель одна на одну та їх злиттю на поверхні розподілу фаз «крапля вільнодисперсної системи – рідина для затвердіння».

3. Удосконалена установка для отримання гранульованих матеріалів з вільнодисперсних систем шляхом зміни її конструктивних елементів, що дозволяє поліпшити гідродинамічні характеристики руху рідини для затвердіння в колоні, поліпшити механізм гранулоутворення та підвищити монодисперсність крапель (гранул).

4. Розроблено спосіб отримання піровуглецевого покриття на частинки каталізатора та ядерного палива. Новизною способу є нагрівання реакційної суміші та охолодження готового продукту, які здійснюються 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.

5. Вдосконалено спосіб одержання пірографіту з низьким виходом аморфного вуглецю. Даний спосіб забезпечує зменшення кількості утвореного аморфного вуглецю внаслідок рівномірного нагрівання реакційної зони при використанні псевдозрідженого шару, відсутність галогенів в реакційній зоні, що виключає можливість утворення токсичних сполук, а оскільки теплота генерується безпосередньо в реакційній зоні, то зменшуються питомі енерговитрати.

6. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження режимів впливу різних частот вимушених коливань на струмені та краплі, аналіз яких дозволив розробити підсилювач вібратора та власну прогресивну технологію їх виробництва, які використовуються для отримання монодисперсного продукту. Результати розробки були впроваджені під час ремонту та модернізації підсилювача вібратора типу ТЕСН 999005.029 для ПАТ «ЧеркасиАзот» (договір №839-413).

7. Під час експлуатації модернізованого підсилювача вібратора були отримані достатньо високі результати за гранулометричним складом продукту, а саме фракція 1-4 мм становила не менше 98 мас. Результати розробки були впроваджені у вигляді нового замовлення для ПАТ «ЧеркасиАзот» на розробку на виготовлення підсилювача вібратора (договір №401-411).

8. Дослідження гідродинамічних характеристик завихрення потоку рідини в середині гранулятора (диспергатора) дозволили поліпшити механізм гранулоутворення та підвищити монодисперсність крапель (гранул).



Результати досліджень впроваджені під час виготовлення за власною прогресивною технологією корзини до вібраційного статичного гранулятора моделі PS 39 грануляційної установки (договір №369 з ПАТ «РівнеАзот»). Результати експлуатації показали можливість отримувати гранулометричний склад продукції у заданому вузькому діапазоні.

## ВИСНОВКИ

1. Золь-гельна технологія є найбільш перспективною для отримання каталізаторів, їх носіїв, модифікованих наповнювачів високого ступеня чистоти і оптимальної дисперсності.

2. Оксид алюмінію за своїми показниками є найбільш вдалим носієм каталізаторів.

3. Розроблена дискретна математична модель для побудови амплітудно-частотної характеристики днища гранулятора. Дана модель представлена тривимірною скінчено-об'ємною розрахункова сітка розрахункової області у вигляді 2,5 млн. розрахункових комірок та враховує інерційні, жорсткісні демпфуючі властивості функціональних елементів.

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

5. Розроблена експериментальна установка для отримання каталізатору  $Al_2O_3$  та запропонована конструкція пульсаційного зміювикового промивача гель-сфер.

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

7. Аналіз результатів числових моделювань показав, що найбільші деформації корпусу гранулятора мають місце під диском, та складають 70 мкм. Після розкладання коливань на елементарні (гармонічні) складові для визначення амплітуди та частоти коливань з'ясовано, що коливання нижньої частини перфорованого днища гранулятора складаються з двох гармонічних коливань 230 Гц та 520 Гц, які відрізняються практично в два рази.

8. За результатами модального аналізу корпусу гранулятора визначено, що перша частота вільних коливань 205 Гц, а друга 380 Гц, третя – 450, четверта – 550 Гц, а характер коливань пояснює несиметричність деформацій середньої частини перфорованого днища корзини.

9. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження процесу розпаду струменя рідини на краплі, який є одним з основних процесів при вібраційному диспергуванні (гранулюванні). В результаті були виявлені режими коливань краплі для різних частот. Показово, що на відносно низьких частотах відбувається загасання струменя з утворенням основної краплі разом з супутником приблизно такого ж розміру. Виявлено, що зі збільшенням частоти вібрації зв'язок між краплею і супутником порушується. Це призводить до утворення ряду порівняно невеликих вторинних супутників. В цьому випадку діаметри крапель і відстань між основними краплями також зменшуються.

10. Розроблена уточнена математична модель деформацій краплі, яка враховує експериментально задані режими [78]. Дана модель засновується як на законі збереження маси, так і на рівнянні нерозривності потоку. В результаті рішення рівнянь математичної моделі отримані аналітичні залежності для компонент швидкості. Модель дозволяє теоретично обґрунтувати зміну знака градієнта радіальної швидкості, як причину розпаду струменя на краплі при вібраційному впливі, а також отримати аналітичні залежності для визначення діаметра і загального числа супутників.

11. Розроблена математична модель нестационарного розпаду крапель. Ця модель враховує вплив об'ємних і поверхневих сил на відносне зміщення краплі, що розпадається. Результати моделювання дозволили отримати залежність для визначення критичного розміру краплі і визначити необхідну частоту коливань. Додатково було отримано критичний діаметр нестабільних крапель і розрахована залежність часу руйнування. Ці дані дозволили аналітично визначити критичне значення числа Вебера. Крім того, залежність між числами Онезорг, Лапласа і Рейнольдса була отримана аналітично і

доведена експериментально. Зокрема, для діаметрів крапель в діапазоні 1,6-2,6 мм числа Рейнольдса і Онезорг знаходяться в діапазоні  $Re = (3,1-7,2) \cdot 10^3$  і  $Oh = (0,35-0,81) \cdot 10^{-3}$  відповідно. Достовірність отриманих результатів підтверджується тим, що критичне значення числа Вебера  $We_{cr}=5,9$  знаходиться в діапазоні  $We_{cr} = 4-20$ , отриманому експериментально попередніми дослідниками Д. Пажі і В. Галустовим, а також узгодженістю між певним критичним розміром крапель 1,98 мм, що розпадаються, і експериментально отриманим діапазоном діаметрів 1,90-2,05 мм для крапель, які розпадаються на частоті вимушених коливань 240 Гц. При цьому відносна похибка отриманих результатів становить близько 4% [80].

12. Обґрунтовано фізико-математичні моделі руху рідкого краплинного струменя в газовому потоці з точки зору впливу градієнта швидкості на циркуляційні потоки в крапельці. Отримані результати дозволяють сформулювати основи підвищення ефективності масообмінних процесів і продуктивності грануляційного та масообмінного обладнання. Ці результати також дозволяють вибрати умови експлуатації і забезпечити найбільш перспективну технологію реалізації правильної організації газо-рідких потоків в масообмінних апаратах.

13. 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. 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.

14. Напрацьовані дослідні партії гель-сфер носія каталізатора  $Al_2O_3$  діаметром 1,0–3,0 мм, та визначені їх міцність і насипна густина після сушіння та прокалювання в залежності від режиму роботи обертового віброгранулятора, а саме від частоти обертання корзини і частоти коливань

вібратора, та від концентрації азотної кислоти і відношення «порошок – кислота» ( $\text{Al}(\text{OH})_3:\text{HNO}_3$ ).

15. Дослідження фізико-механічних властивостей гранул діоксиду 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 діоксиду алюмінію монодисперсні з діаметром 1,6 мм.

16. У результаті досліджень щодо впливу концентрації азотної кислоти показано, що при співвідношенні складу «порошок – кислота» як 1,05 : 2,0 досягається максимальна величина міцності отриманої гранули (1,8 кг/гран).

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

18. У результаті фізичного моделювання процесів, що протікають у змійовиковому пульсаційному промивачі, визначені залежність швидкості руху гель-сфер від частоти переміщення діафрагми пульсатора, амплітуди переміщення діафрагми пульсатора, середнього діаметра змійовика та ступеня заповнення змійовика гранулами.

19. У результаті термодинамічних розрахунків визначено основні теплофізичні параметри нанесення захисного піровуглецевого покриття на  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , який брали в якості моделі мікросферичного ядерного палива, для випадку електротермічного киплячого шару за температури процесу 900–1500 К і тиску 0,1 МПа.

20. Експериментально доведено можливість нанесення піровуглецевого покриття на гранули  $Al_2O_3$ , які слугували у якості моделі ядерного палива. При цьому під час піролізу в реакторі з електротермічним псевдозрідженим шаром з вуглеводню виділяється пірокарбон при температурі в шарі в діапазоні 1073–1273 К.

21. Експериментально доведено, що пірокарбонова плівка рівномірно покриває всю поверхню гранул. Цей факт підтверджує технологічні умови виробництва ядерного палива.

22. Термодинамічними розрахунками доведена необхідність додавання в реактор інертного газу (азоту або аргону). Цей газ значно зменшує процес золотворення, а отже, зменшує забруднення навколишнього середовища.

22. На основі одержаних теоретичних та експериментальних результатів розроблені спосіб отримання гранульованих матеріалів з вільнодисперсних систем та установка для його здійснення.

23. Удосконалена установка для отримання гранульованих матеріалів з вільнодисперсних систем шляхом зміни її конструктивних елементів, що дозволяє поліпшити гідродинамічні характеристики руху рідини для затвердіння в колоні, поліпшити механізм гранулоутворення та підвищити монодисперсність крапель (гранул).

24. Розроблено спосіб отримання піровуглецевого покриття на частинки каталізатора та ядерного палива. Новизною способу є нагрівання реакційної суміші та охолодження готового продукту, які здійснюються 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.

25. Вдосконалено спосіб одержання пірографіту з низьким виходом аморфного вуглецю. Даний спосіб забезпечує зменшення кількості утвореного аморфного вуглецю внаслідок рівномірного нагрівання реакційної зони при використанні псевдозрідженого шару, відсутність галогенів в реакційній зоні,

що виключає можливість утворення токсичних сполук, а оскільки теплота генерується безпосередньо в реакційній зоні, то зменшуються питомі енерговитрати.

Проведено теоретичні та експериментальні дослідження режимів впливу різних частот вимушених коливань на струмені та краплі, аналіз яких дозволив розробити підсилювач вібратора та власну прогресивну технологію їх виробництва, які використовуються для отримання монодисперсного продукту. Результати розробки були впроваджені під час ремонту та модернізації підсилювача вібратора типу ТЕСН 999005.029 для ПАТ «ЧеркасиАзот» (договір №839-413).

27. Під час експлуатації модернізованого підсилювача вібратора були отримані достатньо високі результати за гранулометричним складом продукту, а саме фракція 1-4 мм становила не менше 98 мас. Результати розробки були впроваджені у вигляді нового замовлення для ПАТ «ЧеркасиАзот» на розробку на виготовлення підсилювача вібратора (договір №401-411).

28. Дослідження гідродинамічних характеристик завихрення потоку рідини в середині гранулятора (диспергатора) дозволили поліпшити механізм гранулоутворення та підвищити монодисперсність крапель (гранул). Результати досліджень впроваджені під час виготовлення за власною прогресивною технологією корзини до вібраційного статичного гранулятора моделі PS 39 грануляційної установки (договір №369 з ПАТ «РівнеАзот»). Результати експлуатації показали можливість отримувати гранулометричний склад продукції у заданому вузькому діапазоні.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Heveling J. Heterogeneous Catalytic Chemistry by Example of Industrial Applications. *Journal of Chemical Education*. 2012. -V. 89. P. 1530-1536.
2. Viscon C. G. Alumina: A key-component of structured catalysts for process intensification. *Transactions of the Indian Ceramic Society*. 2012. V. 71. N. 3. P. 123-136.
3. Roy S., Hegde M. S., Madras G. Catalysis for NO<sub>x</sub> abatement. *Applied Energy*. 2009. V. 86. P. 2283-2297.
4. Han S. W., Kim D. H., Jeong M.-G., Park K. J., Kim Y. D. CO oxidation catalyzed by NiO supported on mesoporous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at room temperature. *Chemical Engineering Journal*. 2016. V. 283. P. 992-998.
5. Ratchahat S., Kodama S., Tanthapanichakoon Wi., Sekiguchi H. Combined molten salt-Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as synergistic medium for high-quality syngas production. *Chemical Engineering Journal*. 2015. V. 278. P. 224-233.
6. Zhang L., He H. Mechanism of selective catalytic oxidation of ammonia to nitrogen over Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Journal of Catalysis*. 2009. V. 268. P. 18-25.
7. Serdiuk V., Sklabinskyi V., Bolshanina S., Ableyev A., Dychenko T. Effect of Hydrodynamic Parameters on Membrane Electrolysis Enhancement. in *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*, Cham, 2020, P. 228-238.
8. Hoffmann T., Rieck C., Bück A., Peglow M., Tsotsas E. Influence of granule porosity during fluidized bed spray granulation. In *Proceedings of the Procedia Engineering*; Elsevier Ltd. Vol. 102. 2015. P. 458–467.
9. Paglia, G. Determination of the Structure of  $\gamma$ -Alumina using Empirical and First Principles Calculations Combined with Supporting Experiments (PhD Thesis) - Curtin University of Technology, Perth, 2004.
10. I. Levin and D. Brandon. Metastable Alumina Polymorphs: Crystal Structures and Transition Sequences. *Journal of the American Ceramic Society*. 1998. Vol. 81, no. 8. P. 1995-2012.



11. Li H., Addai-Mensah J., Thomas J. C., Gerson A. R. The influence of Al(III) supersaturation and NaOH concentration on the rate of crystallization of Al(OH)<sub>3</sub> precursor particles from sodium aluminate solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2005. V. 286. P. 511-519.
12. Busca G. The surface of transitional aluminas: A critical review. *Catalysis Today*. 2014. V. 226. P. 2-13.
13. Busca G. Structural, surface, and catalytic properties of aluminas. *Advances in Catalysis*. 2014. V. 57. P. 319-404.
14. Чукин Г.Д. Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций. Москва: Типография Паладин, ООО «Принта», 2010. 288 с.
15. Sung D.M., Kim Y.H., Par E.D., Yie J.E. Correlation between acidity and catalytic activity for the methanol dehydration over various aluminum oxides. *Research on Chemical Intermediates*. 2010. V. 36. P. 653-660.
16. Choudhary T.V., Banerjee S., Choudhary V.R. Review Catalysts for combustion of methane and lower alkanes. *Applied Catalysis A: General*. 2002. V. 234. P. 1-23.
17. Haneda M., Suzuki K., Sasaki M., Hamada H., Ozawa M. Catalytic performance of bimetallic PtPd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for diesel hydrocarbon oxidation and its implementation by acidic additives. *Applied Catalysis A: General*. 2014. V. 475. P. 109-115.
18. Diehl F., Barbier J., Duprez D., Guibard I., Mabilon G. Catalytic oxidation of heavy hydrocarbons over Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Oxidation of C<sub>10</sub>+solid hydrocarbons representative of soluble organic fraction of Diesel soots. *Applied Catalysis A: General*. 2015. V. 504. P. 37-43.
19. Baranowska K., Okal J. Bimetallic Ru-Re/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts for the catalytic combustion of propane: Effect of the Re addition. *Applied Catalysis A: General*. 2015. V. 499. -P. 158-167.
20. Machida M., Taniguchi H., Kijimaa T., Nakatani J. Methane combustion activity of alumina supported Pt, Pd, and Rh catalysts modified by high-energy ion beam irradiation. *Journal of Material Chemistry*. 1998. V. 8. P. 781-785.

21. Yashnik S.A., Ishchenko A.V., Dovlitova L.S., Ismagilov Z.R. The nature of synergetic effect of manganese oxide and platinum in Pt-MnOX-alumina oxidation catalysts. *Topic in Catalysis*. DOI 10.1007/s11244-016-0722-8.
22. Cullis C. F., Nevell T. G., Trimm D. L. Role of the catalyst support in the oxidation of methane over palladium. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*. 1972. V. 68. P. 1406-1412.
23. Cullis C. F., Nevell T. G. The Kinetics of the Catalytic Oxidation Over Palladium of Some Alkanes and Cycloalkanes. *Proceedings of The Royal Society A*. 1976. V. 349. P. 523-534.
24. Семченко Г.Д. Конструкционная керамика и огнеупоры. – Харьков: Штрих, 2000, – 304 с.
25. Теплофизика надежности активных зон: монография / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко и др.; НАН Украины, Ин-т проблем безопасности АЭС. – Чернобыль (Киев. обл.): Ин-т проблем безопасности АЭС, 2015. – 772 с.
26. Ядерные делящиеся материалы: практика обращения, обзор технологий, проблемы и перспективы / А. Никитин, В.Кузнецов, Л. Андреев, А. Золотков, В. Меньшиков, А. Щукин. – Мурманск: Изд. объединение «Беллона», 2012. – 154 с.
27. Котарева И.А., Ошанина И.В., Кузьмичева Г.М., Туркова Т.В., Хайдарова Е.Р., Занавескина С.М., Брук Л.Г., Каля О.Л., Темкин О.Н. Выбор носителя для приготовления катализатора низкотемпературного окисления монооксида углерода. *Тонкие химические технологии*. 2007;2(4):72-77.
28. Н.Ф. Косенко, Н.В. Филатова, Е.А. Липина. Термолиз гидроксонитратов алюминия. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2017. Т. 60. Вып. 8. с.31-36
29. Kosenko N.F., Filatova N.V., Denisova O.P. The mechanically activated decomposition of aluminum nitrate. *Russian Journal Of Chemistry And Chemical Technology*. 2004. V. 47. N 3. P. 74-76.

30. Лидин Р.А., Андреева Л.Л., Молочко В.А. Часть VII. Плотность воды и водных растворов. Глава 3. Соли. Константы неорганических веществ: справочник / Под редакцией проф. Р.А.Лидина. — 2-е изд., перераб. и доп.. — М.: «Дрофа», 2006. С. 641.
31. Марченко И. Н. Синтез и коллоидно-химические свойства гидрозоль бемита и смешанных дисперсий  $AlOOH-ZnO$ : дисс.. канд.а тех. наук: 02.00.11. москва, 2017, 146 с.
32. M. Chatterjee, D. Enkhtuvshin, B. Siladitya, D. Ganguli Hollow alumina microspheres from boehmite sols. *Journal of Materials Science*. 1998. 33. P. 4937 – 4942.
33. Азарова Ж. М. Кремниевые золь-гель материалы, модифицированные аналитическими комплексообразующими реагентами и хлоридом цетилпиридиния, для определения ионов металлов.: дисс. к.х.н.: 02.00.02. Москва. 2005. 180 с.
34. Локтева А. А. Нанокompозитные пленки из органических олигомеров, полимеров и диоксида кремния, и получение на их основе нанопористых просветляющих покрытий на силикатном стекле: дисс. к.х.н. 02.00.06. Нижний Новгород. 2019. с. 112.
35. V. Gonzalez-Pena, I. Diaz, C. Marquez-Alvarez [et al.]. Thermally stable mesoporous alumina synthesized with non-ionic surfactants in the presence of amines. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2001. Vol. 44–45. P. 203–210.
36. H.C. Lee, H.J. Kim, C.H. Rhee [et al.]. Synthesis of nanostructured  $\gamma$ -alumina with a cationic surfactant and controlled amounts of water. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2005. Vol. 79. P. 61–68.
37. P. Bai, W. Xing, Z. Zhang [et al.] Facile synthesis of thermally stable mesoporous crystalline alumina by using a novel cation–anion double hydrolysis method. *Materials Letters*. 2005. Vol. 59. P. 3128–3131.
38. Yang, D. Zhao, D.I. Margolese [et.al.] Block Copolymer Templating Syntheses of Mesoporous Metal Oxides with Large Ordering Lengths and Semicrystalline Framework. *Chemistry of Materials*. 1999. Vol. 11. P. 2813–2826.

39. J.C. Ray, K.-S. You, J.-W. Ahn [et.al.] Mesoporous alumina (I): Comparison of synthesis schemes using anionic, cationic, and non-ionic surfactants. *Journal of Microporous and Mesoporous Materials*. 2007. Vol. 100. P. 183–190.
40. Seki T. M. Onaka Elucidation of basic properties of mesoporous alumina through the temperature-programmed desorption of carbon dioxide and heterogeneous basic catalysis of mesoporous alumina for the Knoevenagel reaction in supercritical CO<sub>2</sub>. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2007. Vol. 263. P. 115–120.
41. N. Cruise, K. Jansson, K. Holmberg. Mesoporous Alumina Made from a Bicontinuous Liquid Crystal-like Phase. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2001. Vol. 241. P. 527–529.
42. L. Sicard, P.L. Llewellyn, J. Patarin [et.al.] Investigation of the mechanism of the surfactant removal from mesoporous alumina prepared in the presence of sodium dodecylsulfate. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2001. Vol. 44-45. P. 195–201.
43. D. Yin, L. Qin, J. Liu [et.al.] Gold nanoparticles deposited on mesoporous alumina for epoxidation of styrene: Effects of the surface basicity of the supports. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2005. Vol. 240. P. 40–48.
44. Жеребцов Д. А. Физико-химические основы управления синтезом стеклоуглеродных и оксидных наноматериалов при помощи поверхностно – активных веществ.: дисс. докт.х.н. 02.00.04. Челябинск 2019. с. 256.
45. Лебедев Л. Л. Коллоидно-электрохимические аспекты защиты от коррозии конструкционных сталей оборудования ядерных энергетических установок.: дисс. канд.тех.наук. 02.00.11 Коллоидная химия. Белгород – 2013. с. 163.
46. Гартман В.Л., Обысов А.В., Дульнеев А.В., Афанасьев С.В. Новая базовая форма катализаторов для реакторов конверсии углеводородов. *Катализ в промышленности*. – 2012. – No 3. – С. 57–61.
47. Shamsutdinova A.N. Brichkov A.S., Paukshtis E.A., Larina T.V., Cherepanova S.V., Glazneva T.S., Kozik V.V. Composite TiO<sub>2</sub>/fiberglass catalyst: Synthesis and characterization. *Catalysis Communications*. 2016. P. 1–17.

48. Smirnova V.V., Ilyin A.P., Brichkov A.S., Zabolotskaya A.V. The Electric Field and Ultrasonic Treatment Casing of Titanium Dioxide. Multifunctional Chemical Materials and Technologies. 2016. Vol.670. C. 3–8.
49. Kozik V.V., Brichkov A.S., Brichkova V.Yu., Ivanov V.K., Tolbanov O.P., Ogorodnikov V.D., Tret'yakov Yu.D. Production and Properties of Nanostructured Composite Films Containing Silica and d-Metal Oxides (Mn, Fe, Co, Ni). Doklady Chemistry. 2012. Vol. 444. P. 155–158.
50. Fedorov A.V., Yazykov N.A., Ermakov D.Yu., Bulavchenko J.A., Yakovlev V.A. Studies of Spherical Granules of the CuO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst Prepared by Drop Molding for the Process of Fluidized Bed Burning of Brown Coal. Kataliz v promyshlennosti. 2017. 17(4). P. 324-330.
51. Юсупов Ф.М. Маманазаров М.М. Кучаров А.А. Саидаббозов С.Ш. Свойства сферических гранул на основе оксида алюминия. Universum: химия и биология: электрон. научн. журн.. 2020. № 3 (69).
52. Одинцова Н. А., Вишневецкая Т. А., Мальцева Н. В., Власов Е. А. Структурированные алюмооксидные суспензии для получения сферических и тонкослойных катализаторов. Известия СПбГТИ (ТУ). 2017. № 39 (65). С. 11-18.
53. Склабінський В. І., Скиданенко М. С., Кононенко М. П., Наталуха А. Р. Підвищення якості гранул отриманих за золь-гельною технологією. Science, society, education: topical issues and development prospects. Abstracts of the 9th International scientific and practical conference. SPC “Sci-conf.com.ua”. Kharkiv, Ukraine. 2020. P. 38-43.
54. Pavlenko I., Liaposhchenko O., Sklabinskyi V., Ivanov V., Gusak O. Ensuring the Reliability of Separation Equipment Based on Parameter Identification of the Operation Process. In: Кнапчикова Л., Балог М., Пераковић Д., Периша М. (eds) New Approaches in Management of Smart Manufacturing Systems. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. Springer, Cham, (2020) pp. 207-216, doi: 10.1007/978-3-030-40176-4\_13 (Book Chapter),

55. Пат. 145173 У Україна, МПК В01D 17/00 Пристрій для розділення двофазних газорідних багатокомпонентних систем / О. О. Ляпощенко, В. Я. Стороженко, М. С. Скиданенко, І. В. Павленко, В. А. Шматенко, М. М. Дем'яненко, О. Є. Старинський, А. С. Хусейн. - Україна., заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. № u202003718 заявл. 19.06.2020, опубл. 25.11.2020, бюл. № 11. - 6 с.
56. Pavlenko I., Marek O., Włodarczyk S., Krupińska A., Markowska M., Dudek L., Piecka C. Cylindrical flow regulators with core hole - chamber diameter effect. *Instal*, 2020. Vol.10, P. 48 – 51.
57. Saito S., Abe Y., Kaneko A., Kanagawa T., Iwasawa Y., Matsuo, E. Ebihara K.I., Sakaba H., Koyama K., Nariai H. Experimental study on jet instability and breakup behavior in liquid-liquid system. In *Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE; American Society of Mechanical Engineers (ASME)*. Vol. 2015. 118695.
58. Cheong B.S., Howes T. Capillary jet instability under the influence of gravity. *Chemical Engineering Science*. Vol. 59. 2004. P. 2145–2157.
59. Yang M., Yan L., Wang Y., Gong C., Lu J. Instability and interfacial coherent structure of free round turbulent jet. *Nongye Jixie Xuebao/ Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. Vol. 47. 2016. P. 35–44.
60. Sanyal A., Basu S. Evaporation excites temporal sequence of resonant modes in a sessile droplet perturbed at constant frequency – Insights into the universal dynamics of mode transitions. *Chemical Engineering Science*. Vol. 176. 2018, P. 294–305.
61. Hoffmann T., Rieck C., Bück A., Peglow M., Tsotsas E. Influence of granule porosity during fluidized bed spray granulation. In *Proceedings of the Procedia Engineering; Elsevier Ltd*. Vol. 102. 2015. P. 458–467.
62. Chen C.W., Lee T. Round Granules of Dimethyl Fumarate by Three-in-One Intensified Process of Reaction, Crystallization, and Spherical Agglomeration in a Common Stirred Tank. *Organic Process Research & Development*. Vol. 21. 2017. P. 1326–1339.

63. Zhang L., Liu W., Zhang Y. Calculation of teeter bed height of teetered bed separator based on jet theory. *Powder Technol.* Vol. 295. 2016. P. 225–233.
64. Zhang X., Cao S., Li D. Study of integrated dust control and dust removal technology based on wall-attached jet theory. *Zhongguo Kuangye Daxue Xuebao. Journal of China University of Mining and Technology.* Vol. 48. 2019. P. 495–502.
65. Skydanenko M., Sklabinskyi V., Saleh S. CFD simulation of ammonium nitrate melt in a perforated rotating bucket. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering; Pleiades Publishing.* 2019. P. 498–506.
66. Vakal V., Pavlenko I., Vakal S., Hurets Skydanenko M., Sklabinskyi V., Saleh S., Barghi S. Reduction of dust emission by monodisperse system technology for ammonium nitrate manufacturing. *Processes.* 2017. 5.
67. Li W., Wang Y., Mumford K.A., Smith K.H., Stevens G.W. Comparison of the axial dispersion performance of pulsed solvent extraction columns with tenova pulsed column–kinetics internals and standard disc and doughnut internals. *Solvent Extraction and Ion Exchange.* Vol. 36. 2018. P. 387–400.
68. Asadollahzadeh M., Hemmati A., Torab-Mostaedi M., Shirvani M., Ghaemi A., Mohsenzadeh Z.S. Use of axial dispersion model for determination of Sherwood number and mass transfer coefficients in a perforated rotating disc contactor. *Chinese Journal of Chemical Engineering.* Vol. 25. 2017. P. 53–61.
69. Khovanskyi S., Pavlenko I., Pitel J., Mizakova J., Ochowiak M., Grechka I. Solving the coupled aerodynamic and thermal problem for modeling the air distribution devices with perforated plates. *Energies.* 2019, 12(18), 3488.
70. L., Ochowiak M. Mathematical Modeling of Nutrient Release from Capsulated Fertilizers. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering,* Vol. 64(4), 2020. P. 562-568,.
71. Xiao F., Jing J., Kuang S., Yang L., Yu A. Capillary forces on wet particles with a liquid bridge transition from convex to concave. *Powder Technology.* 363. 2020. P. 59–73.
72. Murase K., Arai K., Ootsuka T., Sakamoto D., Egawa F. Numerical and experimental estimation on the normal and tangential capillary bridge force adhered

to two spheres. In Proceedings of the Handling and Processing of Granular Systems 2018 - Topical at the 8th World Congress on Particle Technology; AIChE. 2018. P. 46–53.

73. Wei M.R., Liu F., Wen H., Liu Y.C., Zhan, Y.S. Dispersion equation of three-dimensional unstable disturbing wave on surface of a viscous liquid jet with evaporating. Neiranji Xuebao/Transactions CSICE (Chinese Society for Internal Combustion Engines). 23. 2005. P. 430–435.

74. Tammissola O., Lundell F., Daniel Söderberg L. Surface tension-induced global instability of planar jets and wakes. Journal of Fluid Mechanics. 713. 2012. P. 632–658.

75. Driessen T., Sleutel P., Dijksman F., Jeurissen R., Lohse D. Control of jet breakup by a superposition of two Rayleigh-Plateau-unstable modes. Journal of Fluid Mechanics. 749. 2014. P. 275–296.

76. Itoh K., Tsuji Y., Nakamura H., Kukita Y. Free-Surface Shear Layer Instabilities on a High-Speed Liquid Jet. Fusion Science and Technology. 37. 2000.

77. Jia B.Q., Xie L., Cui X., Yang L.J., Fu Q.F. Linear stability of confined coaxial jets in the presence of gas velocity oscillations with heat and mass transfer. Physics of Fluids . 31. 2019.

78. on the droplet generation for microdroplet deposition manufacture. Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf. 2009, 223, 1529–1539.

79. Xie, R.; Chu, L.Y.; Chen, W.M.; Zhao, Y.; Xiao, X.C.; Wang, S. Preparation of monodispersed porous microcapsule membranes with SPG membrane emulsification and interfacial polymerization. Gao Xiao Hua Xue Gong Cheng Xue Bao/Journal Chem. Eng. Chinese Univ. 2003, 17, 400–405.

80. Mu, K.; Si, T.; Li, E.; Xu, R.X.; Ding, H. Numerical study on droplet generation in axisymmetric flow focusing upon actuation. Phys. Fluids 2018, 30.

81. Chen, X.; Ren, C.L. Experimental study on droplet generation in flow focusing devices considering a stratified flow with viscosity contrast. Chem. Eng. Sci. 2017, 163, 1–10.



82. Беденинг Д. Газоохлаждаемые высокотемпературные реакторы. Пер. с нем. М.: Атомиздат. – 1975. – 224 с
83. Status report IAEA № 96: «High Temperature Gas Cooled Reactor - Pebble-Bed Module (HTR-PM)». Last update: 10-08-2011. – 18 p. (<https://aris.iaea.org/PDF/HTR-PM.pdf>)
84. Knol S., de Groota S., Salama R.V., Besta J., Bakker K., Bobeldijka I., Westlake J.R., Fütterer M.A., Laurie M., Chunhe Tang, Rongzheng Li, Bing Li, Hongsheng Zhao. HTR-PM fuel pebble irradiation qualification in the high flux reactor in Petten. Nuclear Engineering and Design. Volume 329, 2018, P. 82 – 88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.09.020>
85. Семейко К.В. Перспективы использования микротвэлов в атомной энергетике / Энергетика и ТЭК. 2015. № 7/8. С. 14 – 16.
86. Воеводин В.Н. Углерод-графитовые материалы в ядерной энергетике (обзор) / В.Н. Воеводин, Ю.А. Грибанов, В.А. Гурин, И.В. Гурин, В.В. Гуйда // Вопросы атомной науки и техники. 2015. № 2. С. 52-64.
87. Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems / Issued by the OECD Nuclear Energy Agency for the Generation IV International Forum. January 2014. 64 p
88. Богомолов В.А., Кожан А.П., Бондаренко Б.И., Ховавко А.И., Семейко К.В. Капсулирование кварцевого песка пироуглеродом в электротермическом псевдооживленном слое / Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2013. – № 5. – С. 36–40.
89. Семейко К.В. Исследование характеристик и свойств пироуглеродных покрытий / К.В. Семейко // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2018. – № 1. – С. 37 – 43.
90. Semeiko K. V. Dependence of the pyrocarbon structure on the parameters of the process of pyrolysis of hydrocarbon gases in an electrothermal fluidized bed / K. V. Semeiko, S. S. Kustovskyi, S. V. Kupriyanchuk, R. E. Chumak // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. –2020. – Vol. 93, №. 3. – P. 677 – 684. DOI: [10.1007/s10891-020-02166-9](https://doi.org/10.1007/s10891-020-02166-9)

91. Семейко К.В. Исследование некоторых теплофизических особенностей процесса нанесения защитного пироуглеродного покрытия на модель микротвэла / К.В. Семейко // Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстан. – 2020. – Выпуск 1 (81). – С. 23 – 29.
92. Sinjarev G. Using of computers in metallurgical processes calculations/ G. Sinjarev, N. Vatolin, B. Trusov, H. Moiseev – Moscow: Nauka, 1982.
93. 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 - 112 с..
94. 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.
95. 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.
96. 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.
97. 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.

98. 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.
99. Дем'яненко, М. М. Гідродинаміка та гідроаеропружність динамічних сепараційних пристроїв : дис. ... д-ра філософії : 133. Суми, 2021. 214 с.
100. 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)
101. 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)
102. 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.
103. 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.*
104. 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.
105. 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.
106. Сімейко К.В., Маліновській А.І., Карсім С.О., Сидоренко М.А., Кустовська А.Д., Ляпощенко О.О., Купріячук С.В. Дослідження процесу одержання піровуглецю в електротермічному псевдозрідженому шарі. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2021. №3. С.32-43.
107. Пат. 146598 U 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.
108. Пат. 146599 U 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.
109. Пат. 146619 U Україна, МПК С04В35/536, F16С33/16, 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.
110. 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.

111. 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.

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

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

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

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

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

117. Піменов О. О. Підвищення надійності конічних зубчастих передач шляхом застосування МСЕ / О. О. Піменов; наук. кер.: І. В. Павленко, М. М. Дем'яненко // Перший крок у науку : матеріали XI студентської конференції (м. Суми, 23.02.2020 р.); у 2-х ч. - Ч. 2. - Секція «Сучасні технології у промисловому виробництві. Механічна інженерія. Актуальні екологічні проблеми». - Суми: СумДУ, 2020. - С. 190.

118. Дем'яненко М. М., Павленко І. В., Скиданенко М. С., Склабінський В. І., Ляпощенко О. О., Старинський О. Є., Самойленко В. О. Методика комп'ютерного моделювання гідромеханічних процесів при віброгрануляції за допомогою метода скінченних об'ємів. Прикладні науково-технічні дослідження : Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції

(Івано-Франківськ, 1–3 квітня 2020 р.). – Івано-Франківськ : Академія технічних наук України, 2020. Том 1 - Хімічна та біоінженерія. С. 113.

119. Badshah, M., Badshah, S., VanZwieten, J., Jan, S., Amir, M., & Malik, S. A. Coupled Fluid-Structure Interaction Modelling of Loads Variation and Fatigue Life of a Full-Scale Tidal Turbine under the Effect of Velocity Profile. *Energies*, 12(11), 2217. doi:10.3390/en12112217 (2019).

120. Lawson, M.J.; Li, Y.; Sale, D.C. Development and verification of computational fluid dynamics model of a horizontal-axis tidal current turbine. In *Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Rotterdam, the Netherlands, 19–24 June 2011; American Society of Mechanical Engineers: Rotterdam, the Netherlands, 2011; pp. 711–720.

121. Mujahid B. Saeed B. Sakhi J. Comparison of computational fluid dynamics and fluid structure interaction models for the performance prediction of tidal current turbines. *Journal of Ocean Engineering and Science*. Vol. 5, Iss. 2, pp. 164-172 (2020)

122. Tian, W., VanZwieten, J. H., Pyakurel, P., & Li, Y. (2016). Influences of yaw angle and turbulence intensity on the performance of a 20 kW in-stream hydrokinetic turbine. *Energy*, 111, 104–116. doi:10.1016/j.energy.2016.05.012

123. Özkan, F., Wenka, A., Hansjosten, E., Pfeifer, P., & Kraushaar-Czarnetzki, B. (2015). Numerical investigation of interfacial mass transfer in two phase flows using the VOF method. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 10(1), 100–110. doi:10.1080/19942060.2015.1061555.

124. Özkan, F., Wörner, M., Wenka, A., & Soyhan, H. S. (2007). Critical evaluation of CFD codes for interfacial simulation of bubble-train flow in a narrow channel. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 55, 537–564.

125. Calderbank, H., & Moo-Young, M. B. (1961). The continuous phase heat and mass-transfer properties of dispersions. *Chemical Engineering and Science*, 16, 39–54.

126. 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.
127. 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.
128. 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.
129. Rehman, K.U., 2020. Object dependent optimization of hydrodynamic forces in liquid stream: Finite element analysis. *Journal of Molecular Liquids*, 298, 111953.
130. Hu, S.; Nadim, A. Three models for rectilinear particle motion with the basset history force. *Electron. J. Differ. Equ.* 2015, 2015, 1–19.
131. 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.
132. 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.
133. 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.
134. 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.

135. Azennar, R.; Mentagui, D. On some properties of the conformable fractional derivative. *Moroc. J. Pure Appl. Anal.* 2020, 6, 210–217, doi:10.2478/mjpa-2020-0016.
136. 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.
137. 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.
138. Кононенко М. П. Вплив параметрів роботи тарілчастих грануляторів на процес високотемпературного гранулоутворення / М. П. Кононенко // Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма VII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 21–24 квітня 2020 р.). - Суми: СумДУ, 2020. - С.260-261.
139. Yurchenko O., Sklabinskyi V., Ochowiak M., Ostroha R., Gusak O. (2022). Rational choice of a basket for the rotational vibropriller. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 9(1), pp. F16-F20, [https://doi.org/10.21272/jes.2022.9\(1\).f3](https://doi.org/10.21272/jes.2022.9(1).f3)
140. Sklabinskyi, V.; Liaposhchenko, O.; Pitel, J.; Pavlenko, I.; Skydanenko, M.; Ostroha, R.; Yukhymenko, M.; Simeiko, K.; Demianenko, M.; Volf, M.; Starynskyi, O.; Yurchenko, O.; Mandryka, O. Experimental Studies and Condition Monitoring of Auxiliary Processes in the Production of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by Sol–Gel Technology. *Processes* 2022, 10, 2090. <https://doi.org/10.3390/pr10102090>
141. Merzliakov, I.; Pavlenko, I.; Ochowiak, M.; Ivanov, V.; Agarwal, P. Experimental Studies of a Liquid–Steam Jet Apparatus. *Processes* 2022, 10, 984. <https://doi.org/10.3390/pr10050984>
142. Nadhem, Al-Khyatt Muhamad and Skydanenko, Maksym and Ostroha, Ruslan and Neshta, Anna and Yukhymenko, Mykola and Yakhnenko, Serhii and Zabitsky, Dmitry and Yesypchuk, Symeon and Moskalchuk, Oleksii, Research of Plate Granulator Operation Modes in the Production of Coarse Carbamide Granules



- (February 11, 2022). Technology Audit and Production Reserves, 1(3(63), 12–15, 2022. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.252367>, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4072951> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4072951>
143. Liaposhchenko, O., Moiseev, V., Manoilo, E., Seif, H. (2022). Purification of Oilfield Wastewater by Inertial Methods. In: Ivanov, V., Pavlenko, I., Liaposhchenko, O., Machado, J., Edl, M. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1_16)
144. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: справочник в 4 т. / [ ред. Глушко В.П.]. – : Академия Наук, 1978-1982.
145. JANAF Thermochemical tables: - Waschington: US Gov.Print. Office, 1971. [2-nd edition. NSRDS-NBS 37].- 1141p.
146. 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 : звіт про НДР (проміжний) / кер. В. І.Склябінський. Суми : СумДУ, 2021. 142 с.
147. Ochowiak, M., Bielecki, Z., Bielecki, M., Włodarczak, S., Krupińska, A., Matuszak, M., Choiński, D., Lewtak, R., & Pavlenko, I. The D2-Law of Droplet Evaporation When Calculating the Droplet Evaporation Process of Liquid Containing Solid State Catalyst Particles. Energies. 2022. 15(20), 7642; <https://doi.org/10.3390/en15207642>.
148. Pitel', J.; Hrdlička, J.; Pavlenko, I. Special Issue on Modelling, Simulation and Control in Combustion Processes of Renewable Fuels. Processes 2022, 10 (12), 2530; <https://doi.org/10.3390/pr10122530>
149. Sklabinskyi V. I., Pavlenko I. V., Pitel J. Monitoring of Hydrodynamics and Mass Transfer in Vortex Flows. Lüdenscheid : RAM-VERLAG, 2022. -253 P. ISBN 978-3-96595-021-4.
150. Ochowiak M., Bizon K., Markowska M., Krupińska A., Matuszak M., Włodarczak S., Hyrycz M., Pavlenko I. The design, development and study of swirl

primary separators. *Chemical Engineering Research and Design*. 2022. 185. P. 176-185. DOI: 10.1016/j.cherd.2022.07.009.

151. Nadhem A.-K. M., Skydanenko M., Ostroha, R. et. Theoretical regularities of nitrogen fertilizer granulation process in plate granulator // *Innovations and prospects of world science. Proceedings of the 6th International scientific and practical conference*. Perfect Publishing. Vancouver, Canada. 2022. P. 165-167.

152. Neshta A. Skydanenko M. Olada Ie. et. Results of numerical simulation of Sulphur dioxide absorption tower with different types of nozzles// *Eurasian scientific discussions. Proceedings of the 1st International scientific and practical conference*. Barca Academy Publishing. Barcelona, Spain. 2022. pp. 157-160.

153. Moiseev V., Liaposhchenko O., Hatala M., Manoilo E., Khukhryanskiy O. Experimental Investigation of Gas-Liquid Layer Height in a Combined Contact Device. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2022. C. 623-633. DOI: 10.1007/978-3-030-91327-4\_60. (Scopus ta WoS)

154. Demianenko M, Starynskyi O, Pavlenko I, Sklabinskyi V, Trojanowska J, Skydanenko M, Liaposhchenko O, Ivanov V. Impact of dynamic characteristics of gears on the reliability of prilling equipment. *EAI/Springer Inno Comm Comp* 2022:197-211. DOI 10.1007/978-3-030-90462-3\_13

155. Pavlenko O., Muzylyov D., Shramenko N., Cagáňová D., Ivanov V. *Mathematical Modeling as a Tool for Selecting a Rational Logistical Route in Multimodal Transport Systems.*, 2023. C. 23-37.

# ДОДАТКИ

## Додаток А

Додаток І до наказу №521-І від 23.06.2-11 р.

Шаблон за версією 03  
Затверджено наказом  
Ректора СумДУ  
№0364-І від 23.04.2020 р.



Міністерство освіти і науки України  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
НАКАЗ

« 11 » січ 2022 20 р.

м.Суми

№ 0014/зв

[Про відрядження за кордон]

### НАКАЗУЮ:

Направити у відрядження за кордон Склабінського Всеволода Івановича

(прізвище, ім'я, по батькові)

на умовах, що визначені у службовій записці, яка є невід'ємним додатком до наказу.

Ректор/інша посадова особа  
за розподілом повноважень

### Погоджено:

Проректор за напрямом діяльності  
(відповідно до мети відрядження)

Директор

(декан, проректор за підпорядкуванням служби)

Начальник управління міжнародного співробітництва

(посада)

(підпис)

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

### Службова записка щодо відрядження за кордон

«10» січня 2022 р.

Ректору СумДУ. Прошу Вашого дозволу на відрядження\* Склабінського Всеволода Івановича

№ 04

завідувача кафедри хімічної інженерії факультету ТеСЕТ

до Німеччина Offenburg RROACCOM GMBH

(країна)

(місто)

(назва організації)

Мета відрядження, проектування обладнання для гранулювання каталізаторів

Термін відрядження: з 21.01.2022 по 31.01.2022 (по Україні – 0 діб, за кордоном – 10 діб).

Фінансові умови: - кошти приймаючої сторони, у т.ч. гранта (підкреслити необхідне);

- грантові кошти з рахунку СумДУ \_\_\_\_\_ грн;

(зазначається назва гранту та/або № договору)

- кошти наукових договорів \_\_\_\_\_ грн;

(зазначається № теми)

- кошти загальноуніверситетського спецфонду \_\_\_\_\_ грн; кошти субрахунків \_\_\_\_\_ грн, у т.ч.:

Назва підрозділу	Усього, грн.	У тому числі за статтями, грн.		Підпис та П.І.Б. відповідальних за субрахунки
		інші витрати	спонсорська допомога	

та/або \_\_\_\_\_ грн. за рахунок інших джерел, а саме:

До службової записки додаються:

- плановий кошторис за підписом у тому числі ініціатора відрядження та начальника ПФВ;

- документи – підстави для відрядження: \_\_\_\_\_

(наводиться перелік)

(посада ініціатора відрядження (керівник структурного підрозділу або вища посадова особа))

(підпис)

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Погоджено: служби обліку коштів за визначеними джерелами

фінансування (крім коштів загальноуніверситетського спецфонду)

(підпис)

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Додаток до наказу №0658-І від 13.08.2020 р.

Шаблон за версією 01  
Затверджено наказом  
ректора СумДУ  
№0658-І від 13.08.2020 р.

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

*Савченко В. І.*  
ПІБ співробітника  
*ХІ*  
Посада

ЛИСТ ПРО ОСОБИСТЕ ОЗНАЙОМЛЕННЯ

з правилами здійснення виїздів за кордон під час дії карантинних обмежень

Даним листом підтверджую, що я, *Савченко В. І.*, ознайомлений із умовами наказу № 0658-І від 13.08.2020 р. «Щодо введення в дію правил для здійснення закордонних відряджень та виїздів за програмами академічної мобільності на час дії карантинних обмежень» та беру на себе відповідальність за їх дотримання під час виїзду за кордон.

Дата

*10.01.2022р.*

Підпис

*Савченко В. І.*

ProAccom GmbH - Am Waldbach 30 - 77654 Offenburg

Prof. Vsevolod SKLABINSKYI, DSc., Professor  
Head of the Department of Chemical Engineering

Sumy State University,  
2 Rymskogo-Korsakova St.  
40007 Sumy, Ukraine

Matthias Heilemann  
Am Waldbach 30  
77654 Offenburg

Fon: +49 (0) 7 21 / 75 40 36 9-0  
Fax: +49 (0) 7 21 / 75 40 36 9-9  
Mobil: +49 (0) 1 51 / 52 46 33 04  
m.heilemann@proaccom.de  
www.proaccom.de

Datum: 05.01.2022

Subject: Invitation Letter

It is my pleasure to invite you as a researcher at the ProAccom GmbH within a short-term research internship "Catalyst Granulation Equipment Design" in a period from January 21, 2022 to January 31, 2022.

Your research will be the next step of our collaboration and corresponds to the research area of our company. I confirm the significance of your project for the up-to-date engineering trends. We are convinced that your experience will make a significant contribution to the related research in this area at our company. And I will provide all the technological facilities for achieving scientific novelty and high quality of the expected outcomes.

Our company will cover costs associated with your trip, per diem and accommodation. The salary for your research is not provided.

Chief Executive Officer  
**PROACCOM GMBH**



Matthias Heilemann  
**WWW.PROACCOM.DE**

ProAccom GmbH - Am Waldbach 30 - 77654 Offenburg

Prof. Vsevolod SKLABINSKYI, DSc., Professor  
Head of the Department of Chemical Engineering

Sumy State University,  
2 Rymyskogo-Korsakova St.  
40007 Sumy, Ukraine

Matthias Heilemann  
Am Waldbach 30  
77654 Offenburg

Fon: +49 (0) 7 21 / 75 40 36 9-0  
Fax: +49 (0) 7 21 / 75 40 36 9-9  
Mobil: +49 (0) 1 51 / 52 46 33 04  
m.heilemann@proaccom.de  
www.proaccom.de

Datum: 05.01.2022

Confirmation letter

It is with great pleasure that I confirm that Prof. Vsevolod SKLABINSKYI, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemical Engineering, Sumy State University, successfully completed a short-term scientific internship "Designing Equipment for Catalyst Granulation" at ProAccom GmbH from January 21, 2022 to January 31, 2022.

During this period prof. Vsevolod SKLABINSKYI was invited by the company Maschinenbau Eitner GmbH & Co. KG as an expert for scientific discussions and consultations with the aim of modernizing and possibly redesigning granulation equipment as part of the development of a new project for metallurgical and machine-building enterprises in the EU.

Chief Executive Officer



Matthias Heilemann

**PROACCOM GMBH**

 [WWW.PROACCOM.DE](http://www.proaccom.de)

**ProAccom**

ProAccom GmbH - Am Waldbach 30 - 77654 Offenburg

Prof. Vsevolod SKLABINSKYI, DSc.,

Professor Head of the Department of Chemical Engineering

Sumy State University, 2 Rymaskogo-Korsakova St.  
40007 Sumy, Ukraine

Matthias Heilemann  
Am Waldbach 30  
77654 Offenburg

Fon: +49 (0) 7 21 / 75 40 36 9-0  
Fax: +49 (0) 7 21 / 75 40 36 9-9  
Mobil: +49 (0) 1 51 / 52 46 33 04  
m.heilemann@proaccom.de  
www.proaccom.de

Datum: 05.01.2022

Тема: Лист-запрошення

Мені приємно запросити вас як дослідника в ProAccom GmbH в рамках короткострокового дослідницького стажування «Проектування обладнання для гранулювання каталізатора» у період з 21 січня 2022 року по 31 січня 2022 року.

Ваше дослідження стане наступним кроком нашої співпраці і відповідає дослідницькій сфері нашої компанії. Я підтверджую значущість вашого проекту для сучасних тенденцій інженерії. Ми переконані, що ваш досвід зробить значний внесок у відповідні дослідження в цій галузі в нашій компанії. І я забезпечу всі технологічні можливості для досягнення наукової новизни та високої якості очікуваних результатів.

Наша компанія покриває витрати, пов'язані з вашою поїздкою, добовими та проживанням. Заробітна плата за ваше дослідження не передбачена.

Chief Executive Officer  
**PROACCOM GMBH**

  
Matthias Heilemann  
**WWW.PROACCOM.DE**

*Переклад відповідає оригіналу  
Народський ЗМС*

ProAccom GmbH - Am Waldbach 30 - 77654 Offenburg

Prof. Vsevolod SKLABINSKYI, DSc., Professor  
Head of the Department of Chemical Engineering

Sumy State University,  
2 Rymyskogo-Korsakova St.  
40007 Sumy, Ukraine

Matthias Heilemann  
Am Waldbach 30  
77654 Offenburg

Fon: +49 (0) 7 21 / 75 40 36 9-0  
Fax: +49 (0) 7 21 / 75 40 36 9-9  
Mobil: +49 (0) 1 51 / 52 46 33 04  
m.heilemann@proaccom.de  
www.proaccom.de

Datum: 05.01.2022

Subject: Invitation Letter

It is my pleasure to invite you as a researcher at the ProAccom GmbH within a short-term research internship "Catalyst Granulation Equipment Design" in a period from January 21, 2022 to January 31, 2022.

Your research will be the next step of our collaboration and corresponds to the research area of our company. I confirm the significance of your project for the up-to-date engineering trends. We are convinced that your experience will make a significant contribution to the related research in this area at our company. And I will provide all the technological facilities for achieving scientific novelty and high quality of the expected outcomes.

Our company will cover costs associated with your trip, per diem and accommodation. The salary for your research is not provided.

Chief Executive Officer  
**PROACCOM GMBH**

  
Matthias Heilemann

 **WWW.PROACCOM.DE**





Міністерство освіти і науки України  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

НАКАЗ

« 11 » СІЧ 2022 20 р.

м.Суми

№ 001/зв

[Про відрядження за кордон]

НАКАЗУЮ:

Направити у відрядження за кордон Склабінського Всеволода Івановича  
(прізвище, ім'я, по батькові)

на умовах, що визначені у службовій записці, яка є невід'ємним додатком до наказу.

Ректор/інша посадова особа  
за розподілом повноважень

[Signature] (підпис) (Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

**Погоджено:**

Проректор за напрямом діяльності  
(відповідно до мети відрядження)

[Signature] (підпис) (Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Директор  
(декан, проректор за підпорядкуванням служби)

Олександр Букан (підпис) (Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Начальник управління міжнародного співробітництва

Костянтин Кириченко (підпис) (Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

\_\_\_\_\_ (посада)

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Службова записка

щодо відрядження за кордон

«10» січня 2022 р.

№ 04

Ректору СумДУ. Прошу Вашого дозволу на відрядження\* Склабінського Всеволода Івановича

завідувача кафедри хімічної інженерії факультету ТеСЕТ

до Німеччина Offenburg RROACCOM GMBH  
(країна) (місто) (назва організації)

Мета відрядження проектування обладнання для гранулювання каталізаторів  
Термін відрядження: з 21.01.2022 по 31.01.2022 (по Україні – 0 діб, за кордоном – 10 діб).

Фінансові умови: - **кошти приймаючої сторони**, у т.ч. гранта (підкреслити необхідне);

- грантові кошти з рахунку СумДУ \_\_\_\_\_ грн;  
(зазначається назва гранту та/або № договору)

- кошти наукових договорів \_\_\_\_\_ грн;  
(зазначається № теми)

- кошти загальноуніверситетського спецфонду \_\_\_\_\_ грн; кошти субрахунків \_\_\_\_\_ грн, у т.ч.:

Назва підрозділу	Усього, грн.	У тому числі за статтями, грн.		Підпис та П.І.Б. відповідальних за субрахунки
		інші витрати	спонсорська допомога	

та/або \_\_\_\_\_ грн. за рахунок інших джерел, а саме:

До службової записки додаються:

- плановий кошторис за підписом у тому числі ініціатора відрядження та начальника ПФВ;

- документи – підстави для відрядження: \_\_\_\_\_  
(наводиться перелік)

\_\_\_\_\_ (посада ініціатора відрядження (керівник структурного підрозділу або вища посадова особа))

\_\_\_\_\_ (підпис) (Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

**Погоджено** : служби обліку коштів за визначеними джерелами

фінансування (крім коштів загальноуніверситетського спецфонду)

\_\_\_\_\_ (підпис) (Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

\_\_\_\_\_ (підпис) (Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

\_\_\_\_\_ (підпис) (Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

## IV МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

# ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙ У АТОМНУ ЕНЕРГЕТИКУ

30 ВЕРЕСНЯ 2022 РОКУ  
ІНСТИТУТ ГАЗУ НАН УКРАЇНИ  
М. КИЇВ, ВУЛ. ДЕГТЯРІВСЬКА, 39

РЕЄСТРАЦІЯ  
ДО 22 ВЕРЕСНЯ



## ІНФОРМАЦІЙНЕ ПОВІДОМЛЕННЯ

### ПРОГРАМА:

ПЛЕНАРНІ  
ДОПОВІДІ



СЕКЦІЙНІ  
ДОПОВІДІ



ФАХОВА  
ДИСКУСІЯ



### ОРГАНІЗАТОРИ:

- УКРАЇНСЬКЕ ЯДЕРНЕ ТОВАРИСТВО
- РАДА МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ПРИ ВІДДІЛЕННІ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГЕТИКИ НАН УКРАЇНИ



### СПІВОРГАНІЗАТОРИ:

- РАДА МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ІНСТИТУТУ ГАЗУ НАН УКРАЇНИ
- РАДА МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ІНСТИТУТУ ПРОБЛЕМ БЕЗПЕКИ АЕС НАН УКРАЇНИ
- ДП «ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР З ЯДЕРНОЇ ТА РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ»
- РАДА МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ІНСТИТУТУ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ
- РАДА МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ІНСТИТУТУ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ НАН УКРАЇНИ

<https://u>

### ІНФОРМАЦІЙНІ ПАРТНЕРИ

- ТЕЛЕКАНАЛ «ПРАВДАТУТ»
- ГРОМАДСЬКЕ РАДІО
- ЛЕКТОРІЙ «SCIENTIFIC MEETINGS»
- ЖУРНАЛ «ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ТА РЕСУРСОБЕРЕЖЕННЯ»
- ГАЗЕТА «СВІТ»

громадське радіо  
слухайте, думайте.



ПРАВДАТУТ



### ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

ГОЛОВА: СІМЕЙКО К. В., Д.Т.Н., ПРОФ. И.С. ІНСТИТУТУ ГАЗУ НАН УКРАЇНИ, ГОЛОВА НАУКОВО-АНАЛІТИЧНОЇ СЕКЦІЇ УКРАЇНСЬКОГО ЯДЕРНОГО ТОВАРИСТВА, ЗАСТУПНИК ГОЛОВИ РМВ ФТФЕ НАН УКРАЇНИ, ЕКСПЕРТ УКРАЇНСЬКОГО КОМІТЕТУ «SIGRE»  
СПІВГОЛОВА: ХОМІЧ О. М., НАЧАЛЬНИК ЗМІНИ БЛОКУ ВП «ХМЕЛЬНИЦЬКА АЕС» ДП «НАЕК «ЕНЕРГОАТОМ», ГОЛОВА МОЛОДІЖНОЇ СЕКЦІЇ УКРАЇНСЬКОГО ЯДЕРНОГО ТОВАРИСТВА  
ВИКОНАВЧИЙ СЕКРЕТАР: ЛАВРЕНКО Д. А., К. ПОЛ. И. ВИК. СЕКРЕТАР УКРАЇНСЬКОГО ЯДЕРНОГО ТОВАРИСТВА  
СЕКРЕТАР: КУПРІЯНЧУК С. В., ГОЛОВА РАДИ МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ТА М. И. С. ІНСТИТУТУ ПРОБЛЕМ БЕЗПЕКИ АЕС НАН УКРАЇНИ

#### Члени комітету:

- КОСОВСЬКИЙ А. В., АКАДЕМІК НАН УКРАЇНИ, Д.Т.Н., ПРОФ., ДИРЕКТОР ІНСТИТУТУ ПРОБЛЕМ БЕЗПЕКИ АЕС НАН УКРАЇНИ
- ШУЛЬГА М. Ф., АКАДЕМІК НАН УКРАЇНИ, Д.Ф.М.И., ПРОФ., ГЕНЕРАЛЬНИЙ ДИРЕКТОР НАЦІОНАЛЬНОГО НАУКОВОГО ЦЕНТРУ «ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
- ЖУК Г. В., Д.Т.Н., ПРОФ., ДИРЕКТОР ІНСТИТУТУ ГАЗУ НАН УКРАЇНИ
- КРАВЧЕНКО В. П., Д.Т.Н., ПРОФ., ЗАВ. КАФЕДРИ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ДУ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
- ГОДУН О. В., ГОЛОВНИЙ ІНЖЕНЕР ВП «НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР» ДП «НАЕК «ЕНЕРГОАТОМ»
- PIONO IG, DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCE, PROFESSOR, FOREIGN FELLOW OF NAS OF UKRAINE, PROFESSOR OF ONTARIO TECH UNIVERSITY
- БАГЛЮК Г. А., ЧЛЕН-КОРЕСПОНДЕНТ НАН УКРАЇНИ, Д.Т.Н., ПРОФ., ЗАСТУПНИК ДИРЕКТОРА ІНСТИТУТУ ПРОБЛЕМ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ІМ. І.М. ФРАНЦЕВИЧА НАН УКРАЇНИ
- СЕМЕРАХ М. М., Д.Т.Н., ПРОФ., ЗАВ. КАФЕДРИ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ, ТЕПЛОВИХ ТА АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ІУ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
- ГЛІНСЬКІХ О. Г., НАЧАЛЬНИК ЗМІНИ БЛОКУ, ІНСТРУКТОР І КАТЕГОРІЇ ЦЕНТРУ ПІДГОТОВКИ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛУ ВЩУ ВП «ЗАПОРІЗЬКА АЕС» ДП «НАЕК «ЕНЕРГОАТОМ»
- ВЛІНОВ І. В., Д.Т.Н., С.И.С., ЗАСТ. ДИРЕКТОРА ІНСТИТУТУ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ НАН УКРАЇНИ
- ТЕНКАЛЕУ Ур., REPRESENTATIVE OFFICE OF UAN LOKMIS (ЛІТВІА)
- ДІМІТРИЄВА Д. О., НАЧАЛЬНИК ВІДДІЛУ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ТА ЯДЕРНОЇ ЗАХИЩЕНОСТІ ДЕРЖАВНОГО НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ЦЕНТРУ З ЯДЕРНОЇ БЕЗПЕКИ
- ЛЯПОЩЕНКО О. О., Д.Т.Н., ПРОФ., ЗАСТ. ДЕКАНА ФАКУЛЬТЕТУ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ СУМСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
- СТЕПАНЕНКО Ю. М., К.Ф.М.И., С.И.С. ІНСТИТУТУ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ, ГОЛОВА РМВ ПРИ ВІДДІЛЕННІ ЯДЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ НАН УКРАЇНИ
- Литвинюк С. М., «УСТЕМ GBARITE COMPANY»
- ЖАБІН С. О., К.ІСТ.И., С.И.С. ДУ ІНСТИТУТ ДОСЛІДЖЕНЬ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТА ІСТОРІЇ НАУКИ ІМ. Г.М. ДОБРОВА НАН УКРАЇНИ
- ВІЛАН Т. Р., К.Т.Н., С.И.С. ДЕРЖАВНОГО НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ЦЕНТРУ З ЯДЕРНОЇ БЕЗПЕКИ, С.И.С. ІНСТИТУТУ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ НАН УКРАЇНИ
- ШЕНДЕРОВИЧ В. Я., ВЕТЕРАН АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ
- БОРИСЕНКО В. І., Д.Т.Н., ЗАВІДУВАЧ ВІДДІЛЕННЯ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ІНСТИТУТУ ПРОБЛЕМ БЕЗПЕКИ АЕС НАН УКРАЇНИ
- ЗЕНЮК О. Ю., ВІЦЕ-ПРЕЗИДЕНТ УКРАЇНСЬКОГО КОМІТЕТУ «SIGRE»

ПОСИЛАННЯ ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ

ТЕЛЕФОН ДЛЯ ДОВІДОК: +380505050885

**WORLDWIDE CONGRESS**  
of Mineral Fertilizers & Pesticides Producers

10 February, 2022

# DIPLOMA

Participation in the Eighth technical online session  
of discussion club SCIF

**INDUSTRIAL SAFETY OF HAZARDOUS PRODUCTION  
FACILITIES**

**ALEXANDER LIAPOSHCHENKO**

Sumy State University



President  
SCIF Congress



Leonid Khalimon

**УКРАЇНСЬКЕ  
ЯДЕРНЕ  
ТОВАРИСТВО**



**UKRAINIAN  
NUCLEAR  
SOCIETY**

БЦ «Почайна-Центр»,  
а/с 49, оф. 1211,  
пр-т. С. Бандери, буд.6,  
м. Київ, 04073, Україна  
тел./факс +38 044 464 53 08  
E-mail: [info@ukrms.org](mailto:info@ukrms.org)

код ЄДРПОУ 19218084  
Р/рахунок № UA 10 322313  
0000028009000041153  
в АТ «Укресімбанк»,  
<http://www.ukrms.org>

Pochaina-Center  
Box 49, of.1211, 6 Bandera  
Ave.,Kyiv, 04073, Ukraine  
tel. /fax +38 044 464 53 08  
E-mail: [info@ukrms.org](mailto:info@ukrms.org)

Вих. № 217 від 13.09.2022 р.

Ректору Сумського державного  
університету  
Василю КАРПУШІ

*Щодо участі у IV Міжнародній конференції  
«Перспективи впровадження  
інновацій у атомну енергетику»*

### **Шановний Василю Даниловичу!**

Українське ядерне товариство та Рада молодих вчених при Відділенні фізико-технічних проблем енергетики НАН України проведе IV Міжнародну конференцію «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику». Інформаційні партнери заходу - телеканал «ПравдаТУТ», «Громадське радіо», лекторій «Scientific Meetings», журнал «Енерготехнології та ресурсозбереження», газета «Світ».

В рамках конференції експерти ядерної галузі, науковці, представники атомно-промислового комплексу та молоді фахівці представлятимуть у своїх доповідях напрацювання з актуальних питань розвитку атомної енергетики, зокрема щодо новітніх розробок у сфері підвищення безпеки АЕС, світових тенденцій розвитку реакторних технологій, інноваційних ядерних технологій, рекомендацій щодо функціонування ринку електроенергії, підвищення економічної ефективності атомної енергетики тощо. Після виступу доповідачів відбудеться експертна дискусія на тему: «Функціонування та розвиток атомної енергетики України з урахуванням наслідків Російської агресії».

З огляду на важливість тематики конференції запрошуємо Вас та Ваших колег, зокрема д.т.н., проф. Ляпоценка Олександра Олександровича, д.т.н., проф. Павленка Івана Володимировича, д.т.н., проф. Склабінського Всеволода Івановича, взяти участь у вищезазначеному заході.

Захід відбудеться 30 вересня 2022 року, реєстрація о 9:00, початок о 10:00, місце проведення: м. Київ, вул. Дегтярівська, 39, Інститут газу НАН України.

Реєстрація на конференцію доступна за посиланням:  
<https://forms.gle/6rXftdrNbz33bdTc6>

У разі додаткових питань можна звертатися на електронну скриньку [info@ukrms.org](mailto:info@ukrms.org) або за телефоном +38 (050) 440 44 19.


Будемо раді бачити Вас на заході!

Додаток: Інформаційне повідомлення – IV Міжнародна конференція  
«Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику» на 3 арк.

З повагою  
виконавчий секретар  
Українського ядерного товариства, к.пол.н.

голова оргкомітету, заст. голови  
Ради молодих вчених при ВФТПЕ НАН України,  
пров. наук. співр. Інституту газу НАН України, д.т.н.

  
Данило  
ЛАВРЕНОВ

  
Костянтин  
СІМЕЙКО



**НПО УКРХИММАШ**

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

Вих. № СДУ 22-02/1 від 21/02/2022 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ «НПО УКРХИММАШ»

Я. В. Сіренко

«21» лютого 2022 р.



### АКТ

#### про впровадження (використання) результатів науково-дослідної роботи

Комісія у складі:

голова - Технічний директор Кулешов Ігор Ігорович

члени комісії:

- Головний інженер Фесенко Володимир Миколайович

склали даний Акт про те, що результати науково-дослідної роботи (НДР) ДР №0120U102036 «Створення нових гранульованих матеріалів для ядерного палива та каталізаторів в активному гідродинамічному середовищі» (науковий керівник – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник Склабінський В.І.) використані в виробничій діяльності ТОВ «НПО УКРХИММАШ». Отримані наукові результати та практичні рекомендації представляють високу науково-практичну цінність, мають перспективи до впровадження при проектуванні та виготовленні високоефективного енергозберігаючого грануляційного обладнання.

Результати використані при наданні науково-консультаційних послуг на підставі дилерської угоди між Сумським державним університетом та ТОВ «НПО УКРХИММАШ» від 20.04.2021 р.

Голова комісії І.І.Кулешов

Члени комісії В.М.Фесенко



Ел. адреса: [ukrhimash@gmail.com](mailto:ukrhimash@gmail.com)

Адрес: 40034, Україна, г. Сумы, ул. Заливная, 29/1  
Тел.: +38 (0542) 67-77-07, тел/факс: +38 (0542) 67-68-00  
Моб.: +38 (066) 671-77-77; e-mail: [ukrhimash@gmail.com](mailto:ukrhimash@gmail.com)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор СумДУ

(посада')

Леонов С.В.

(прізвище, ініціали)

20\_\_ р.



**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 держресстрації, назва теми, етапу)

Етап 3 - Узагальнення і оцінювання результатів науково- дослідних робіт

яка виконана в період з січня 2022 р. по грудень 2022 р.

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. Обґрунтовано можливості інтенсифікації гідромеханічних та тепломасообмінних процесів отримання нових гранульованих речовин за рахунок накладання віброакустичних коливань. Розроблено математичні моделі впливу активних гідродинамічних і тепломасообмінних режимів, проведено числове моделювання процесу вібраційної грануляції в активному гідродинамічному середовищі гелю. За результатами експериментальних досліджень надано рекомендації щодо режимно-технологічної та апаратурно-конструктивної оптимізації процесу гранулоутворення за золь-гельною технологією. Наведено рекомендації з вибору та обґрунтування параметрів, що впливають на характеристики отриманого продукту за золь-гельною технологією.

(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: в.о. зав. кафедри хімічної інженерії, к.т.н., Острога Р.О.

(посада, прізвище, ініціали)

ст. наук. співробітник, к.т.н. Скиданенко М.С.

(посада, прізвище, ініціали)

встановила впровадження в навчальний процес результатів досліджень та місце їх використання<sup>2</sup>:

1. Результати досліджень були використані при курсовому проектуванні бакалаврів (Мандрика О.О., Москальчук О.М., Сергієнко А.Р.) і підготовці випускних кваліфікаційних робіт магістрів (Наталуха А.Р., Звягін І.О., Єсипчук С.С., Іваненко Д.І., наукові керівники – виконавці НДР к.т.н., ст. наук. співробітник Юхименко М.П., к.т.н., ст. наук. співробітник Скиданенко М.С.). У співавторстві зі студентами опубліковано 1 статтю і подано 1 статтю до публікації у журналах, що входять до науково-метричних баз даних Scopus / Web of Science, а також отримано 1 патент на корисну модель України.

2. Виконавцями НДР (докторанти - к.т.н., ст. наук. співробітник, Скиданенко М.С., к.т.н., ст. наук. співробітник, Острога Р.О., аспіранти – Старинський О.Є., Сейф Хуссейн, Юрченко О.Ю., Шматенко В.А., Нічволодін К.В., Бондар Д.І.) розроблено методологію моделювань та інженерні методики розрахунку, що можуть бути використані у подальших прикладних розробках сепараційного, тепломасообмінного і грануляційного обладнання на матеріально-технічній базі лабораторії грануляційного і масообмінного обладнання (ЛГМО) кафедри хімічної інженерії (ХІ) факультету ТеСЕТ СумДУ, в тому числі при виконанні практичних і лабораторних робіт, а також випускних кваліфікаційних робіт бакалаврів / магістрів зі спеціальності 133 – галузеве машинобудування із залученням їх до практико-орієнтованого навчання під час виконання держбюджетних та госпдоговірних НДДКР з оплатою праці. Виконавці НДР (наук.

керівник - д.т.н., проф., гол. наук. співробітник Склабінський В.І., відп. виконавець - к.т.н., ст. наук. співробітник, докторант Скиданенко М.С., виконавець - д.т.н., проф., пров. наук. співробітник Ляпошенко О.О.) приймали участь у обговоренні з закордонними компаніями науково-технічної співпраці з впровадження нових розробок грануляційного обладнання, зокрема, на отриманий запит в рамках ліцензійної угоди СумДУ з компанією CS TECHNOLOGY досягнуто домовленостей про розробку комплексу конструкторської документації для виготовлення високопродуктивного гранулятора і технологічну підготовку виробництва грануляційного обладнання.

3. Виконавцями НДР (к.т.н., ст. наук. співробітник Скиданенко М. С., к.т.н., ст. наук. співробітник Острога Р. О.) у 2022 р. підготовлено та подано заявки на конкурс проектів наукових робіт та науково-технічних (експериментальних) розробок молодих вчених (секції «Безпечна, чиста та ефективна енергетика», «Зміна клімату, довкілля чисте будівництво та раціональне природокористування»), а також згідно Постанови Комітету з Державних премій України в галузі науки і техніки їм призначено стипендії Кабінету Міністрів України для молодих вчених з листопада 2022 року.

4. Наук. керівник НДР д.т.н., проф., гол. наук. співробітник Склабінський В.І. отримав індивідуальний грант і впродовж 21-31.01.2022 успішно виконав програму закордонного наукового стажування «Проектування обладнання для гранулювання каталізаторів» (грантодавець - ProAccom GmbH, Offenburg, Germany, обсяг фінансування на суму 61 069,61 грн. Виконавець НДР д.т.н., проф., ст. наук. співробітник Павленко І.В. отримав десять індивідуальних грантів від всесвітньовідомої редакції наукових журналів «MDPI» (Швейцарія) на суму 29 459,58 грн. Виконавець НДР к.т.н., ст. наук. співробітник Острога Р. О. отримав індивідуальний грант та був запрошений у закордонне наукове відрядження до Словацької Республіки, м. Кошице, Технічний університет в Кошице, і впродовж 27.10.2022-03.11.2022 успішно виконав програму цього стажування (обсяг фінансування – 15 100,00 грн).

5. Виконавці НДР приймали участь у восьмій технічній міжнародній онлайн сесії дискусійного клубу SCIF – WORLDWIDE CONGRESS of Mineral Fertilizers & Pesticides Producers (д.т.н., проф., гол. наук. співробітник Склабінський В.І., д.т.н., проф., пров. наук. співробітник Ляпошенко О.О., д.т.н., проф., ст. наук. співробітник Павленко І.В., к.т.н., ст. наук. співробітник, докторант Скиданенко М.С.), EURATOM NCP in UKRAINE On-line WORKSHOP 2022 (д.т.н., проф., гол. наук. співробітник Склабінський В.І., д.т.н., проф., пров. наук. співробітник Ляпошенко О.О.), а також є організаторами 3rd Seminar on Practical Aspects of Chemical Engineering PAIC-2022 (член наукового комітету - д.т.н., проф., пров. наук. співробітник Ляпошенко О.О.) та IV міжнародного круглого столу «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику» (голова організаційного комітету – Сімейко К.В., д.т.н., пров. наук. співробітник інституту газу НАН України, член організаційного комітету - Ляпошенко О.О., д.т.н., проф., пров. наук. співробітник).

6. 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», Сейф Хуссейна «Моделювання процесів сепарації у багатофункціональних модульних трифазних нафтогазоводороділювачах», Юрченка О.Ю. «Гідродинаміка середовища у кошику вібраційного гранулятора мінеральних добрив», Шматенка В.А. «Моделювання процесів розділення багатокомпонентних систем у біопаливних технологіях», Нічволодіна К.В. «Термодинамічні показники гранул з використанням обертового вібраційного гранулятора (ОВГ)», Бондар Д.І. «Моделювання та оптимізація систем сепарації з осушенням стисненого повітря в компресорних установках»; докторантів - Скиданенка М.С. «Теоретичні основи процесів вібраційного гранулювання мінеральних добрив у баштах», Острога Р.О. «Теоретичні основи процесів формування гранул у неоднорідному середовищі».

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Голова комісії: \_\_\_\_\_

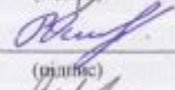


(підпис)

О.Г.Гусак

(прізвище, ініціали)

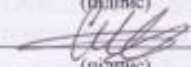
Члени комісії: \_\_\_\_\_



(підпис)

Р.О.Острога

(прізвище, ініціали)



(підпис)

М.С.Скиданенко

(прізвище, ініціали)

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 151790

ПРИСТРІЙ ДЛЯ СЕПАРАЦІЇ СТІЙКИХ ЕМУЛЬСІЙ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей  
14.09.2022.

В.о. Генерального директора  
Державного підприємства  
«Український інститут  
інтелектуальної власності»

  
О.В. Опанасенко

