

Міністерство освіти та науки України
Сумський державний університет

На правах рукопису

КОЧЕРГІН МИКОЛА ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 661.525.099.2

ГІДРО - ТА ТЕРМОДИНАМІЧНІ УМОВИ ФОРМУВАННЯ ПОРИСТОЇ
СТРУКТУРИ ГРАНУЛ АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ

Спеціальність 05.17.08 - процеси та обладнання хімічної технології

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
доктор технічних наук, професор
Склабінський Всеволод Іванович

Суми – 2010

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	с. 5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	14
1.1 Основні методи одержання гранул мінеральних добрив	14
1.2 Вплив різних факторів на формування гранул	19
1.3 Математична модель теплообміну в гранулі	28
1.4 Основні властивості гранул	30
1.5 Способи одержання гранул пористої структури	35
1.5.1 Одержання пористої аміачної селітри за допомогою пороутворюючих і поверхнево-активних речовин	35
1.5.2 Одержання пористої аміачної селітри шляхом висушування її гранул або кристалів	37
1.5.3 Одержання пористої аміачної селітри шляхом термообробки її гранул	40
1.6 Висновки до першого розділу, постановка завдання досліджень	42
РОЗДІЛ 2 ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	45
2.1 Загальна методика проведення досліджень	45
2.2 Методи і засоби математичного моделювання	45
2.3 Експериментальна установка для визначення часу перебування гранул у вологому середовищі	46
2.4 Експериментальна установка для проведення дослідження в статичних умовах	47
2.5 Експериментальна установка для проведення досліджень в умовах псевдозрідженого шару	48

2.6	Методика проведення експериментальних досліджень	50
2.7	Методика обробки результатів експериментальних досліджень. Оцінка впливу похибок замірів на результати досліджень	50
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМО-Й ГІДРОДИНАМІЧНИХ УМОВ СТВОРЕННЯ ПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ В ГРАНУЛІ		53
3.1	Опис запропонованої фізичної моделі й постановка завдання теоретичних досліджень термодинамічних впливів на гранулу	53
3.2	Аналіз теплового впливу навколишнього потоку на гранулу	56
3.3	Аналіз процесу сушіння гранули	62
3.4	Визначення кількості тепла, необхідного для формування пористої структури гранули	63
3.5	Силовий вплив на гранулу в потоці газу зі швидкістю, що змінюється	69
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМО- Й ГІДРОДИНАМІЧНИХ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА УТВОРЕННЯ ПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ В ГРАНУЛІ		80
4.1	Задачі експериментальних досліджень	80
4.2	Методика проведення досліджень по визначенню часу перебування гранул у вологому середовищі	81
4.3	Методика проведення досліджень в статичних умовах	88
4.4	Узагальнення результатів	89
4.4.1	Залежність вологовмісту матеріалу від часу сушіння	90
4.4.2	Швидкість сушіння	94
4.4.3	Порівняльна оцінка характеристик гранул різної пористості	99
4.5	Методика проведення досліджень в умовах псевдозрідженого шара	105
4.6	Узагальнення результатів експерименту	107

4.7	Співставлення результатів експерименту та моделювання за допомогою програмних продуктів Flow Vision 2003 demo	112
4.8	Співставлення результатів експерименту з теоретичними дослідженнями	114
4.9	Висновки до четвертого розділу	115
	РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ВИХРОВОГО ГРАНУЛЯТОРА	117
5.1	Опис принципу роботи і пристрою вихрового гранулятора	117
	РОЗДІЛ 6. ВПРОВАДЖЕННЯ ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВОЇ УСТАНОВКИ ОТРИМАННЯ ПОРИСТОЇ АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ	121
6.1	Інженерна методика розрахунку основних характеристик термо-та гідродинамічних параметрів	121
6.2	Застосування отриманих даних у промисловій практиці	123
6.3	Оцінка вартості при виробництві пористої аміачної селітри	129
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	130
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	13
	ДОДАТКИ	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.

$Ar = \frac{d^3(\rho_c - \rho_c)\rho_c g}{\mu_c^2}$	- критерій Архімеда;
a	- коефіцієнт температуропровідності, м ² /с.
C	- теплоємність, Дж/(кг-К);
$C_{ГР}$	- теплоємність матеріалу гранули, Дж/(кг-К);
C_B	- теплоємність води, Дж/(кг-К);
d	- діаметр, м;
$G_{ТВ}$	- масова витрата гранул, кг/с;
g	- прискорення вільного падіння, м/с ² ;
h	- висота, м;
i	- питома теплота паротворення, Дж/кг;
K	- коефіцієнт сушіння, год ⁻¹ ;
m	- коефіцієнт дифузії, см ² /с;
$m_{ГР}$	- маса гранули, кг;
$Nu = \beta l / D$	- критерій Нуссельта;
$Pr = \mu / \rho D$	- критерій Прандтля;
p	- парціальний тиск, Па;
p_n	- парціальний тиск парів води над насиченим розчином речовини, Па;
Q	- об'ємна витрата газу, м ³ /с;
q_0	- питома теплота кристалізації Дж;
R	- радіус краплі, м;
r	- поточний радіус, м;
$Re = (wl\rho) / \mu$	- критерій Рейнольдса;
S	- відстань, м;

T	- температура, °C;
U_0	- початковий вологовміст, % мас;
U_p	- рівноважний вологовміст, % мас;
v	- швидкість м/с;
V''	- об'ємна витрата повітря, м ³ /с;
$V_{ГР}$	- об'єм гранули, м ³ ;
$W_{КР}$	- критична швидкість, м/с;
W_p	- рівноважний вміст вологи, % мас;
$\alpha_{эф}$	- ефективний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м ² К;
λ	- коефіцієнт теплопровідності, Вт/м К;
ν	- кінематична в'язкість газу, м ² /с;
ρ	- щільність, кг/м ³ ;
τ	- час, с;
ζ_L	- коефіцієнт лобового опору гранули при турбулентному режимі обтікання.

Скорочення

ПАС	- пориста аміачна селітра
ВР	- вибухові речовини

ВСТУП

Актуальність теми. Одним із затребуваних гранульованих продуктів пористої структури є пориста аміачна селітра (ПАС) [1 – 6]. Тому, приймаючи в даній роботі аміачну селітру як модельний продукт для вивчення процесів гранулювання, одночасно вирішується й практичне завдання - створення розрахункової методики для промислових способів одержання ПАС.

Основний споживач пористої аміачної селітри - це гірничодобувна промисловість, у якій пориста селітра використовується для готування простих вибухових речовин (ВР).

Найпростіші вибухові речовини на основі гранульованої аміачної селітри й дизельного палива знайшли, завдяки своїй дешевині й високій ефективності, широке застосування як у країнах СНГ, так і в США, Канаді, Англії, Японії. У США й Канаді близько 70% гірської маси, що добувається вибуховим способом на відкритих і підземних розробках, виробляється за допомогою таких речовин [1, 2].

При додаванні 6% рідкого палива до звичайної гранульованої селітри сільськогосподарського призначення воно практично не всмоктується гранулами, але залишається на їхній поверхні. Після перемішування суміш має вигляд замасленої несипучої зернистої маси. Такі суміші називають ігданітами. Вони виготовляються безпосередньо на місці застосування й призначаються для використання в якості вибухових речовин в гірничій справі як для відкритих, так і для підземних робіт.

Недоліком ігданітів [1] є швидке стікання рідкого пального компонента з поверхні гранул. Наприклад, через 1,5 години після приготування ігданіта, вміст у ньому дизельного палива знижується на 30÷70%, тому що воно стікає в нижні шари маси, й ефективність дії такого ігданіта знижується аж до повної відсутності детонації. Тому сучасні ефективні промислові суміші стали випускати на основі спеціально виготовленої пористої аміачної селітри (ПАС),

яка добре поглинає і утримує рідкі нафтопродукти та відрізняється однорідністю й стабільністю сполуки при тривалому збереженні.

У колишньому Радянському Союзі така суміш одержала назву «грануліт М». Вона виготовлялася не на місці споживання, як ігданіти, а на спеціальних установках і доставлялася споживачам упакованою в паперових ламінованих (один шар паперу покритий плівкою поліетилену) або поліетиленових мішках. У першому випадку грануліт може зберігатися не втрачаючи своїх якостей протягом чотирьох місяців, у другому - протягом шести місяців.

У 80-ті роки 20-го століття на об'єднанні Азот міста Руставі (Грузія) були початі спроби одержання пористої аміачної селітри в псевдозрідженому шарі, але з ряду причин, пов'язаних з недоробкою конструкції, вони виявилися невдалими.

Таким чином, для одержання якісних промислових вибухових речовин необхідно в основі мати пористу аміачну селітру з рівномірно розподіленою за структурою гранули пористістю, яка забезпечує не тільки високу здатність вбирати масло, але й ще має високу утримуючу здатність, при збереженні міцнісних властивостей гранули.

У цей час в Україні відсутні виробництва пористої аміачної селітри, а також немає математичної моделі, яка описувала б процеси, що проходять в гранулі в момент її формування. Тому актуальним є заддання розробки фізичної й математичної моделі такого процесу, що дозволяє створити надійний інженерний метод розрахунку промислового процесу одержання пористої аміачної селітри.

Для експерименту була обрана гранульована аміачна селітра також і тому, що вона широко застосовується в сільському господарстві [6], гірничодобувній промисловості й гранула за своїми властивостями найбільш складна для дослідження.

Одним із найпростіших методів отримання пористої структури у вже сформованій гранулі є насичення її вологою з подальшим виділенням цієї

вологи [1, 2]. Установлення закономірностей, яким підкоряється процес випаровування вологи із гранульованої аміачної селітри, необхідно для визначення оптимальних умов для утворення пористої структури в гранулі.

Відсутність надійних методів одержання пористих гранул з необхідними властивостями для малотоннажних виробництв ставить завдання розробки нових способів і устаткування для цих цілей.

Все вищевказане вказує на актуальність даної роботи. Актуальність теми також підтверджена висновком, який надав РКХЗ “Зоря”.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає тематичному плану науково-дослідних робіт запланованих на кафедрі «Процеси та обладнання хімічних та нафтопереробних виробництв» (ПОХНВ) Сумського державного університету за темою "Дослідження вихрових, грануляційних та масотеплообмінних пристроїв" (№ держреєстрації 0106U013012), за темою "Відпрацювання технологічних та конструктивних параметрів вихрового гранулятора та видача вихідних даних для проектування гранулятора в складі установки виробництва пористої аміачної селітри потужністю 10 тис. тонн на рік" (замовник ТОВ СП "Проектсистемсервіс"). Під час розробки нових методів одержання ПАС отримано патент на новий спосіб виробництва ПАС, а також розроблений ряд конструкцій вихрового гранулятора [8, 9].

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є визначення термо-та гідродинамічних чинників, за допомогою яких стає можливим створити пористу структуру у попередньо сформованій гранулі аміачної селітри, та розробка науково обґрунтованих рекомендацій щодо проведення цього процесу у робочій камері вихрового гранулятора.

Задачами теоретичного та експериментального дослідження є:

1. Розробка фізичної моделі з подальшим математичним моделюванням впливу термічних та гідродинамічних чинників на процес створення пористої структури у гранулі аміачної селітри.

2. Аналіз відомих способів гранулювання та розробка способу обробки гранул для подальшого формування в них пористої структури.

3. Проведення теоретичного аналізу термо-та гідродинамічних умов протікання процесу створення пор у разі попереднього зволоження гранул та механізму протікання цього процесу під дією гарячого теплоносія.

4. Розробка інженерної методики розрахунку термо-та гідродинамічних умов обробки гранул аміачної селітри з метою створення в них пористого середовища.

5. Дослідно-промислове впровадження розроблених рекомендацій щодо обробки гранул аміачної селітри та отримання пористої структури гранул.

Об'єктом дослідження є процес впливу потоку теплоносія на зволожені гранули аміачної селітри.

Предмет дослідження – термо- та гідродинамічні чинники, що впливають на процес формування у гранулах аміачної селітри пористої структури.

Наукова новизна одержаних результатів.

- вперше було проведене моделювання термо-й гідродинамічних умов створення пористої структури в суцільній гранулі після її обробки вологим середовищем;

- запропонована фізична й математична моделі, що дають пояснення процесу формування пористої структури у попередньо сформованій гранулі;

- за результатами експериментальних досліджень вперше отримано гідро та термодинамічні характеристики режимів обробки гранул з метою створення в них пористої структури;

- вивчено властивості пористої аміачної селітри за умови отримання пористої структури із суцільної гранули.

Практичне значення одержаних результатів. На основі теоретичних і експериментальних досліджень впливу термодинамічних і гідродинамічних умов на структуру одержуваних гранул, пошуку шляхів керування структурою гранул, за рахунок підбора термодинамічних і гідродинамічних режимів у

робочій зоні гранулятора, розроблено методику розрахунку процесу утворення пористої структури гранул аміачної селітри. Визначено термо-й гідродинамічні параметри та умови здійснення такого процесу, що дозволило розробити нові способи гранулювання та нові конструкції грануляторів з використанням вихрових потоків. На основі комплексу експериментальних досліджень фізичних явищ, які відбуваються в гранулі в період формування пористої структури, та фізичних властивостей отриманих пористих гранул, визначено основні напрями впливу на процес утворення пор у гранулі з метою досягнення запланованих якісних показників готового продукту та результати роботи впроваджені на РКХЗ “Зоря” при проектуванні лінії виробництва ПАС.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає в проведенні фізичного й математичного моделювання процесів, що протікають у момент формування пористої структури в гранулі, у підборі й апробації методик експериментальних досліджень одержання пористої гранули, конструюванні експериментального устаткування, узагальненні отриманих результатів. Постановка завдання й формування висновків проводилося під керівництвом наукового керівника д.т.н. професора Склабінського В.І. Здобувач брав участь на всіх стадіях науково-дослідних робіт. Про всі результати, які становлять основний зміст дисертаційної роботи, особисто доповідалося на науково-технічних і науково-практичних конференціях [10 – 18]. Отримані результати дозволили в співавторстві одержати деклараційні патенти України й Росії [8, 9] на нові способи й пристрої. У статтях, написаних у співавторстві й опублікованих у фахових видавництвах, затверджених ВАК України [19 – 21, 22] основний внесок здобувача полягає в наступному:

- у роботі [19] описані недоліки існуючих виробництв гранульованої аміачної селітри, а також самої гранульованої аміачної селітри, показані переваги способу одержання пористої аміачної селітри у вихровому потоці, а також самої пористої аміачної селітри;

- у роботі [20] наведений опис експерименту по видаленню вологи із гранули й визначенню швидкості сушіння, у результаті якого були отримані гранули пористої структури;

- у роботі [21] наведені дані експеримента, метою якого було дослідження процесу проникнення тепла в гранулу, а так само вплив температури навколишнього середовища на створення гранул пористої структури, проведене порівняння результатів розрахунку зміни температур у центрі гранули протягом часу отриманих розрахунковим шляхом і за допомогою програмного комплексу FlowVision 2.2 [23].

- у роботі [22] представлена математична модель процесу видалення вологи із гранули з метою створення пористої структури.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету СумДУ (м. Суми, 2004 р.), на VIII Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Технологія 2005» у Технологічному інституті Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Сєверодонецьк, 2005 р.), на науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету СумДУ (м. Суми, 2005 р.), на XI Міжнародній науковій конференції “Удосконалення процесів та обладнання харчових і хімічних виробництв” (м. Одея, 2006 р.), на IX Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Технологія 2006» у Технологічному інституті Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Сєверодонецьк, 2006 р.), на III Українській науково-технічній конференції “Сучасні проблеми технології неорганічних речовин” (м. Дніпропетровськ, 2006 р.), на X Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Технологія 2007» у Технологічному інституті Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Сєверодонецьк,

2007 р.), на науково-технічній конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету СумДУ (м. Суми, 2007 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 14 наукових працях, з них 4 статті в наукових журналах, 8 публікації тез доповідей у матеріалах та працях конференцій. Отримано 1 деклараційний патент на винахід України та 1 деклараційний патент на винахід Росії.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, шости розділів, висновків, списку використаних джерел з 91 найменувань, додатків. Повний обсяг дисертації становить 14 сторінки, серед яких 130 сторінок основного тексту, 19 таблиць, 5 ілюстрацій .

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Основні методи одержання гранул мінеральних добрив

Гранулювання - це сукупність фізико-хімічних і фізико-механічних процесів, що забезпечують формування часток певних розмірів, форми, структури та фізичних властивостей.

Залежно від методу гранулювання гранули можуть мати правильну або неправильну форму. Кращою формою є близька до сферичної, без виступаючих на поверхні нерівностей, що зводить до мінімуму їх стирання з утворенням пилу при переміщеннях [3]. Мінеральні добрива найчастіше випускаються з розміром гранул 2÷4 мм, але можуть виготовлятися з будь-яким заданим гранулометричним складом (1÷3 мм, 1÷5 мм і т.д.) [1,2].

Добрива з розміром гранул більше 4 мм відносять до крупнодисперсної фракції, менше 4 мм - до дрібнодисперсної (товарної) і менше 1 мм - до дрібної фракції [3]. Гранулометричний склад добрив повинен бути якомога більше, а вміст фракції 1 мм - якомога менше. Гранульовані добрива повинні також відповідати певним вимогам за міцністю, пористістю, стиранню й іншими показниками.

На сьогодні вивчені, розроблені й освоєні в промисловості різноманітні схеми гранулювання із застосуванням апаратів різних за конструкцією й за принципом дії [24-44].

Процеси гранулювання мінеральних добрив різноманітні як по методах їхнього здійснення, так і по апаратурному оформленню. Гранулювання проводять шляхом:

- агломерація частинок порошкоподібних матеріалів;
- затвердіння краплі плаву в потоці повітря або в шарі масла;

- здрібнювання великих шматків матеріалу у валкових і молоткових дробарках або дезінтеграторах.

Агломерацію порошкоподібних матеріалів здійснюють наступними методами [1,2]:

- пресуванням на валкових пресах з наступним дробленням спресованого листа або в таблеткових пресах;

- рівномірним зволоженням матеріалів з одночасним обливанням одержуваних агломератів в амонізаторі-грануляторі (А-Г), грануляторах барабанного й тарілчастого типів, шнекових або лопатевих змішувачах (обливання може закінчуватися в сушильному барабані);

- напилюванням розчину або пульпи на поверхню твердих часток з наступною кристалізацією в апаратах типу барабанного гранулятора-сушарки (БГС), амонізатора-гранулятора із внутрішнім ретуром і киплячому шарі (КШ);

- екструзією зволоженої суміші або суміші нагрітих порошкоподібних матеріалів з легкоплавким компонентом через матриці з наступним сушінням і охолодженням гранульованого продукту.

Гранулювання добрив затвердінням крапель плаву в процесі його кристалізації проводять шляхом розбрикування плаву у вигляді крапель заданого розміру в порожніх грануляційних вежах з наступним охолодженням крапель повітрям, а також розбрикуванням крапель плаву над поверхнею рідини з наступним їхнім охолодженням у шарі цієї рідини [1,2].

За кількістю ретура (повернення), що надходить у грануляційний апарат зі стадій дроблення й розсіву, методи гранулювання можна класифікувати на ретурні й безретурні. До першого відносяться методи гранулювання шляхом агломерування.

Залежно від кількості ретура умовно гранулювання може бути малоретурним із кратністю ретура до 5 (число вагових одиниць ретура на 1 ваг. одиницю готового продукту) [1,2] і багаторетурним із кратністю більше 5.

У більшості випадків при гранулюванні складних і складно-змішаних добрив, ретур уводиться в грануляційний апарат для підтримки оптимальної вологості й забезпечення максимального виходу товарної фракції. При цьому кратність ретура визначається загальною кількістю води, що вводиться в апарат з вихідними компонентами, і їхньою розчинністю. Чим більше розчинність солей гранульованої суміші, тим менше потрібно вологи для її гранулювання.

В окремих випадках, наприклад, при гранулюванні добрив методом пресування, або гранулювання суперфосфату методом окатування в присутності вологи, ретур не потрібно, однак він утвориться в процесі гранулювання і його доводиться повертати в процес, підмішуючи до вихідного матеріалу. У цих випадках прагнуть вести процес із мінімальним виходом ретура – дрібної фракції.

До безретурних методів гранулювання відноситься затвердіння ствердження краплі плаву потоком повітря або в маслі.

Сьогодні існують три основних технологічних способи гранулювання твердих речовин з розплавів [3]:

1. Розбрикування крапель розплавів за допомогою різних гранульованих пристроїв в об'ємі грануляційної вежі, де далі відбувається затвердіння крапель і охолодження утворених гранул при їхньому вільному падінні.
2. Напилювання плаву, затвердіння його й подальше охолодження гранул, що утворилися, в умовах киплячого шару.
3. Проведення тих же, що й за способом 2, операцій в умовах обертових барабанів із внутрішніми лопатами – сферодайзерів.

Відомий також комбінований спосіб гранулювання добрив, що сполучає у собі елементи перших двох способів.

Гранулювання з розплаву у вежах відноситься до найпоширеніших способів виробництва гранульованих добрив. У цей час цей спосіб

застосовують для гранулювання аміачної, вапняно-аміачної й кальцієвої селітри, карбаміду й складних добрив.

Аміачну селітру гранулюють у високих (30÷60 м) або низьких (\approx 21 м) вежах. Для гранулювання карбаміду застосовують вежі висотою \approx 50 м. Фосфати амонію й складні добрива, одержувані на основі нітрофосфатів і фосфатів амонію, гранулюють у вежах, висота яких досягає 50÷66 м. Всі ці вежі забезпечені відцентровими розпилювачами.

Практично цей спосіб дозволяє гранулювати будь-які добрива, що мають чітко обумовлену температуру плавлення й відносно низьку в'язкість. Причому, гранулювання добрив з розплаву можливо в широкому інтервалі їх температур плавлення за умови, що властивості добрив у розплавленому стані не змінюються протягом декількох хвилин. Інакше можливе деяке відхилення від правильної (сферичної) форми гранул.

При забезпеченні оптимальних умов гранулювання одержують круглі гранули приблизно однакового розміру. Причому, процес гранулювання й затвердіння відбувається одночасно протягом декількох секунд.

Процес здійснюють у високих порожніх вежах, у яких падаючі краплі охолоджуються зустрічним потоком повітря. Для розбрикування плавів застосовують нерухливі, обертові й вібраційні диспергуючі пристрої, що забезпечують одержання сферичних гранул переважно розміром 1÷3 мм. Нижню частину грануляційних веж забезпечують холодильниками, у яких охолодження гранул відбувається в киплячому шарі, що дозволяє досягти високої ефективності охолодження.

Механізм гранулоутворення полягає в розпаді стікаючих із гранулітного пристрою струменів на краплі, які, охолоджуючись у зустрічному потоці повітря, перетворюються в гранули. При падінні крапля (гранула) віддає тепло потоку охолоджуючого повітря. При цьому охолодження й кристалізація плавів починається з поверхні, а при досягненні температури кристалізації відбувається утворення твердої оболонки, товщина якої в міру руху краплі

(гранули) збільшується [1,2]. Таким чином, фронт кристалізації просувається в центр гранули по радіусу з відповідним виділенням тепла кристалізації. При досягненні поверхнею гранули температури наступного модифікаційного переходу фронт цього переходу з відповідним тепловиділенням починає переміщатися слідом за фронтом кристалізації. Аналогічно відбуваються й подальші модифікаційні переходи в структурі гранули, які ускладнюють процес нестационарної теплопередачі.

Для проведення процесів тепломасообміну у псевдозрідженому шарі використовуються різноманітні конструкції апаратів [45-69]. Сутність способу гранулювання розчинів аміачної селітри в псевдозрідженому (киплячому) шарі полягає в тому, що упарений до концентрації 80÷86% розчин солі за допомогою форсунок розпорошують у псевдозріджений шар твердих часток аміачної селітри. Псевдозрідження шару селітри здійснюють гарячим повітрям (зріджуючий агент). При цьому відбувається випаровування вологи з диспергованої рідини й утворення твердих дрібних часток аміачної селітри. Під час перебування в киплячому шарі ці частки періодично попадають у зону факела диспергованого розчину й змочуються їм. Вийшовши із зони факела, зволожені частки висихають за рахунок тепла гарячого потоку повітря і їхні розміри збільшуються.

Залежно від параметрів технологічного режиму (концентрації розчину, температури повітря, що подається у форсунку для розпилення розчину, дисперсності розпилення, тривалості перебування часток у киплячому шарі й ін.) характер росту часток може змінюватися й поряд з поступовим збільшенням часток за рахунок випару на їх поверхні розчину аміачної селітри може одночасно протікати процес агломерації дрібних гранул, що висихають.

Процес грануляції розчину аміачної селітри проводять в апаратах безперервної дії, тобто в киплячий шар твердих частинок аміачної селітри безперервно вдувають розпорошений розчин селітри і одночасно частину твердого продукту виводять з апарата, підтримуючи при цьому такий

технологічний режим, при якому досягається (у заданих межах) постійність гранулометричного складу продукту, що виходить із апарата.

Обов'язковою умовою нормального протікання процесу грануляції є повернення в киплячий шар певної кількості дрібних часток готового продукту - ретур. Якщо в киплячій шарі мало ретур, гранулометричний склад киплячої шарі швидко зрушується у бік великих гранул і проведення нормального процесу псевдозрідження й грануляції стає неможливим.

При грануляції плавів аміачної селітри псевдозрідження твердих часток цієї солі здійснюють не гарячим повітрям (як у випадку грануляції розчинів селітри), а холодним. Утворення гранул у цьому випадку відбувається в результаті охолодження й кристалізації часток диспергованого плаву в об'ємі факела розпорошеного плаву, а також у результаті нарощування плівки, що закристалізувалася, плаву на поверхні дрібних твердих часток селітри. При цьому так само, як і у випадку грануляції розчинів аміачної селітри, може одночасно протікати процес агломерації в киплячому шарі дрібним, змоченим плавом часток.

1.2 Вплив різних факторів на формування гранул

Характер гранулоутворення, а отже, і розмір гранул залежить від властивостей гранулівних речовин, режимних параметрів і конструктивних особливостей гранулятора. Величина гранул приблизно дорівнює величині краплі або визначається нею у випадку видалення рідини при сушінні [70]. Розмір краплі залежить від поверхневого натягу, в'язкості плаву й умов розбрикування плаву. При витіканні струменя плаву з високою швидкістю утворюються великі сферичні краплі. З підвищенням швидкості дроблення струменя збільшується [70]. Краплі плаву, падаючи зверху вниз, охолоджуються потоком повітря, внаслідок чого плав кристалізується. На краплю буде діяти сила ваги, спрямована вниз, і сила опору середовища.

У загальному вигляді, рівняння руху краплі буде мати вигляд [70]:

$$m \frac{dv}{dt} = mg - \xi S \frac{(v + v_B)^2}{2} \rho, \quad (1.1)$$

де m – маса краплі, кг; t – час, с; v – швидкість краплі щодо стінок апарата м/с; v_B – швидкість газу щодо стінок апарата м/с.

З урахуванням значень m , S , v , v_B , і ξ для ламінарного, перехідного й турбулентного режимів рівняння (1.1) має вигляд

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho_q \frac{dv}{dt} = \frac{\pi d^3}{6} \rho_q g - \frac{24 \mu \pi d^2 \rho_q (v + v_B)^2}{(v + v_B) d \rho_q 4 \cdot 2}; \quad (1.2)$$

Час руху гранули з початковою швидкістю v_1 досягнення швидкості v_2 можна визначити як

$$t = d^2 \rho_q \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{d^2 \rho_q g - 18 \mu v_B - 18 \mu v}. \quad (1.3)$$

Тому що $t = \frac{dS}{v}$, то шлях, який пройде крапля дорівнює

$$S = \int_{v_1}^{v_2} d^2 \rho_q \frac{v dv}{d^2 \rho_q g - 18 \mu v_B - 18 \mu v}, \quad (1.4)$$

де S – шлях краплі; t – час; v_1 і v_2 – початкова й кінцева швидкість ламінарного руху.

У місцях зіткнення кристалів утворюються так звані кристалічні містки, які й визначають міцність гранул. Утворення кристалів, як правило, починається на поверхні охолоджуваної краплі й поширюється від неї в глиб краплі [3]. Схеми

затвердіння обертової й не обертових гранул аміачної селітри при вільному падінні у висхідному потоці повітря зображені на рис.1.1.

Нерівномірність товщини твердої оболонки необертової гранули можна пояснити розходженнями у швидкості теплопередачі. Фізичне тепло й тепло кристалізації від центра рідкої краплі плаву до її периферії передається за рахунок теплопровідності, а з периферії приділяється в навколишнє середовище за рахунок конвекції й випромінювання [7] . При цьому в периферійній області краплі температура знижується нижче температури насичення, утвориться пересичений розчин і починається затвердіння з напрямком фронту кристалізації від периферії до центра [3].

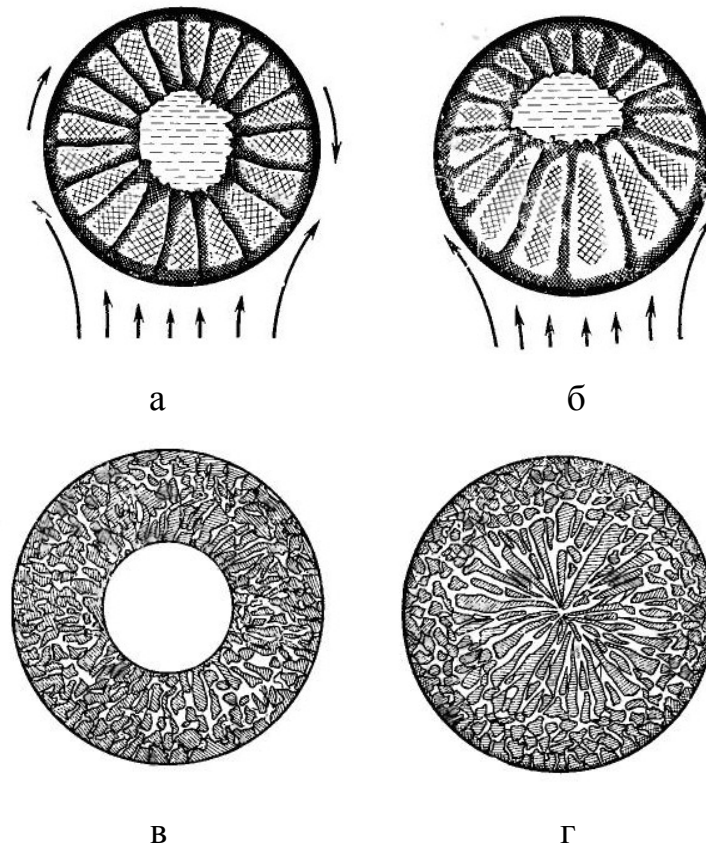


Рис. 1.1 – Схема затвердіння гранул при падінні в струмі висхідного повітря: а - обертова гранула; б - необертова гранула; в - із внутрішньою порожнечею; г - нормальної структури.

У початковий період охолодження й кристалізації, коли створюється найвища швидкість охолодження й, отже, найбільший ступінь пересичення розчину, на поверхні краплі повинна утворитися тонка тверда оболонка з найдрібніших кристалів [3]. Внаслідок менш інтенсивного охолодження й, отже, меншого пересичення розчину внутрішні області гранули повинні заповнюватися більшими кристалами. Об'єм тонкої оболонки гранули близький до об'єму краплі або в межі дорівнює йому (при початковій температурі кристалізації). Подальший процес кристалізації, при якому з'являються тверді фази значно більшої щільності, ніж щільність плаву, повинен призводити до утворення в об'ємі, обмеженому тонкою оболонкою гранули, міжкристалічних пустотних просторів, заповнених матковим розчином і повітрям.

Істотний вплив на механізм гранулювання створює конструкція вежі й механізму розпорошування розплаву, аеродинамічні тепло-і масообмінні процеси, що відбуваються в грануляційній вежі [3].

Траєкторія руху гранул у вежі залежить від конструкції й розподілу потоків повітря по перерізу апарата [70]. Знання траєкторії руху гранул у вежі дозволяє визначити її габарити й умови гранулювання.

Рух краплі у вежі після її викидання розпилювачем або гранулятором з деякою початковою швидкістю v_0 під кутом α_0 відбувається під дією двох сил: сили ваги й сили опору навколишнього середовища. Тому в незакрученому газовому вертикальному потоці траєкторії руху гранул будуть плоскими кривими. Направивши вісь Y вертикально вниз, а вісь X горизонтально, рівняння руху гранули в проекціях на координатні осі будуть мати вигляд [70]

$$\begin{aligned} m \frac{dv_x}{dt} &= -R \cos \alpha; \\ m \frac{dv_y}{dt} &= mg - R \sin \alpha, \end{aligned} \tag{1.5}$$

де m – маса краплі (гранули); v_x, v_y – горизонтальна й вертикальна проекції швидкості; R – сила опору; α - кут між вектором швидкості й горизонтальною площиною.

Також можуть використовуватися залежності отримані з рішення основної системи рівнянь [72], що визначають механіку руху гранули

$$\left. \begin{aligned} m_{ГР} \frac{d^2 x}{d\tau^2} &= \left(-\frac{1}{2} \zeta_{Л} f \rho'' v^2\right)_x \\ m_{ГР} \frac{d^2 y}{d\tau^2} &= \left(-\frac{1}{2} \zeta_{Л} f \rho'' v^2\right)_y + m_{ГР} g \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

де $m_{ГР}$ – маса гранули; x, y – координати падаючої гранули в системі, пов'язаній з полем тяжіння (вісь y спрямована вниз від точки розпаду струменя); $\zeta_{Л}$ – коефіцієнт лобового опору гранули при турбулентному режимі обтікання $\zeta_{Л} = const = 0,5$, а при перехідному режимі обтікання $\zeta_{Л} = 18,5 Re^{-0,6}$.

Максимальна горизонтальна дальність вильоту гранул ($X_{макс}$) залежно від кута й горизонтальної складової початкової швидкості витікання струменя плаву, обчислена Б.Г. Холіним [70] показана на рис. 1.2.

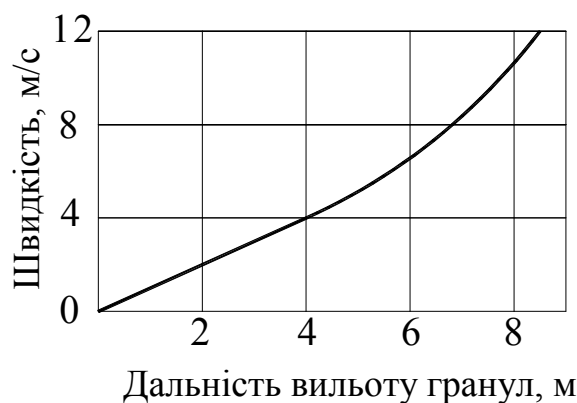


Рис. 1.2 – Залежність дальності вильоту $X_{макс}$ гранули $d = 1,8$ мм від горизонтальної складової початкової її швидкості $W_{0гор}$ (висота падіння 30 м).

З наведеного графіка видно, що для швидкостей, застосовуваних при розбризкуванні плаву, характерна прямолінійна залежність.

Розподіл швидкостей потоку повітря у вежі значною мірою залежить від умов введення потоку. Для попередження завихрень у нижній частині вежі встановлюють розподільний пристрій, що забезпечує близьке до рівномірного розподілу швидкостей повітря у вежі в тангенціальному напрямку (в осьовому напрямку залишається безладним) і нерівномірним. Такий розподіл швидкостей потоку повітря дозволяє попередити налипання матеріалу на стінки вежі. При цьому розподіл подаючих гранул щодо поперечного перерізу вежі залишається нестационарним, що значною мірою ускладнює характер руху гранул у вежі. У звичайних робочих умовах для попередження налипання й зменшення необхідної поверхні вежі забезпечують стаціонарне падіння гранул шляхом підтримки середньої швидкості висхідного потоку повітря, яка трохи менше критичної швидкості, що забезпечує витання гранул [3].

Залежність швидкості падіння гранул аміачної селітри від висоти падіння наведена на рис. 1.3, а. Із графіків [3] видно, що швидкий набір швидкості відбувається на первісній ділянці шляху порядку 2-4 м. Подальше наближення до швидкості усталеного руху відбувається порівняно монотонно, причому зі збільшенням діаметра гранул цей процес затягується.

Зміна швидкості падіння гранул у часі в тих же умовах показане на рис. 1.3, б, з якого виходить, що для гранул діаметром 1 мм ($W = 2\text{ м/с}$) усталений рух настає практично відразу після дроблення струменя, а для гранул діаметром 3 мм - через 4 с, коли необхідна висота падіння перевершує висоту сучасних грануляційних веж. Залежність висоти веж від часу падіння гранул різного розміру наведена на рис. 1.3, в.

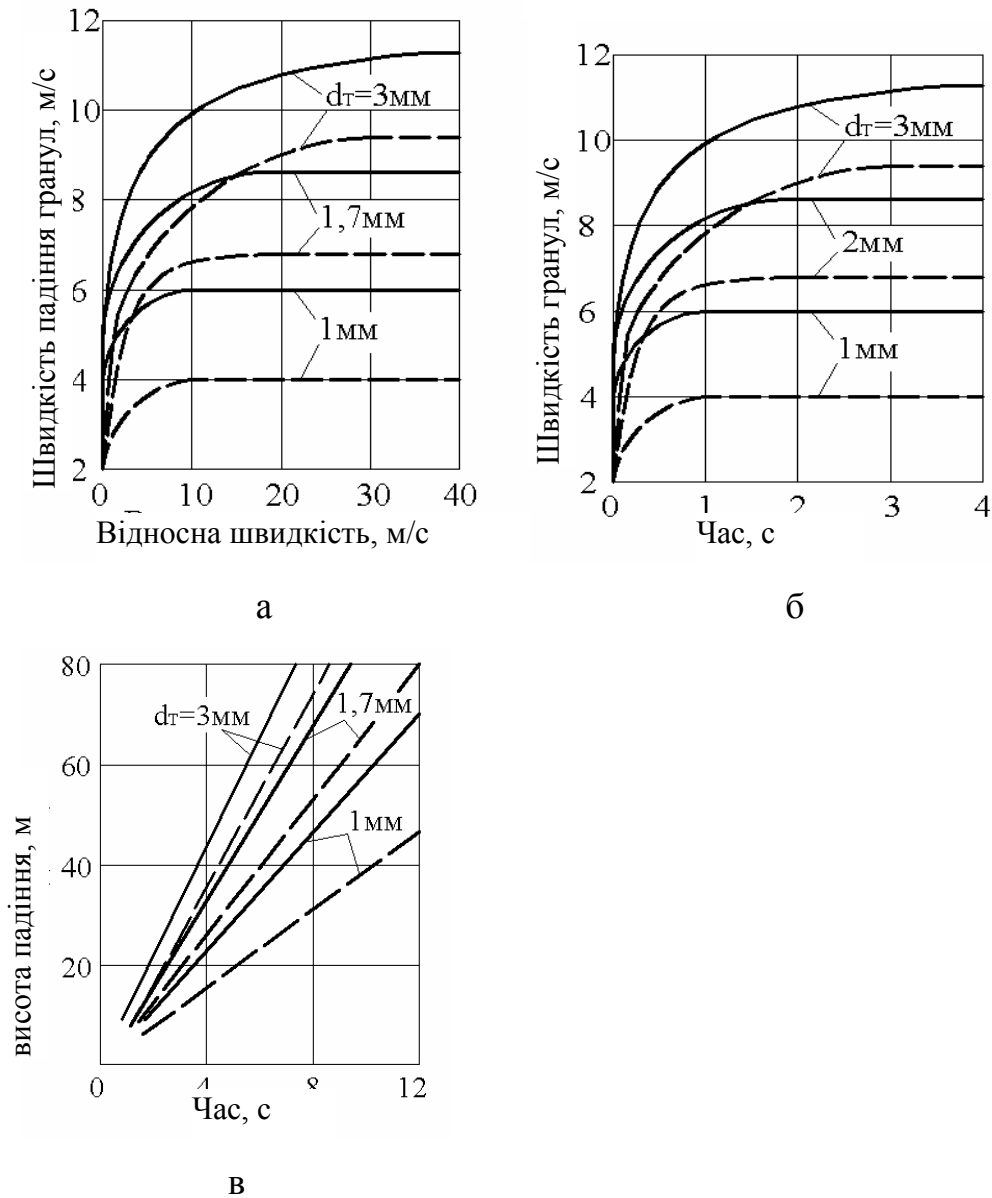


Рис. 1.3 – Залежність швидкості й висоти падіння гранул від часу ($W_0=4\text{ м/с}$; суцільні лінії – падіння в нерухливому повітрі, тобто при $W=0$; пунктирні лінії – при $W=2\text{ м/с}$); а - зміна швидкості стрімкого падіння гранул по висоті вежі; б - залежність швидкості гранул від часу падіння; в - залежність висоти падіння гранул від часу.

Відхилення ефективного коефіцієнта тепловіддачі $\alpha_{\text{эф}}$ від відносної швидкості гранул надане на рис. 1.4, а, а по висоті падіння — на рис. 1.4, б [3].

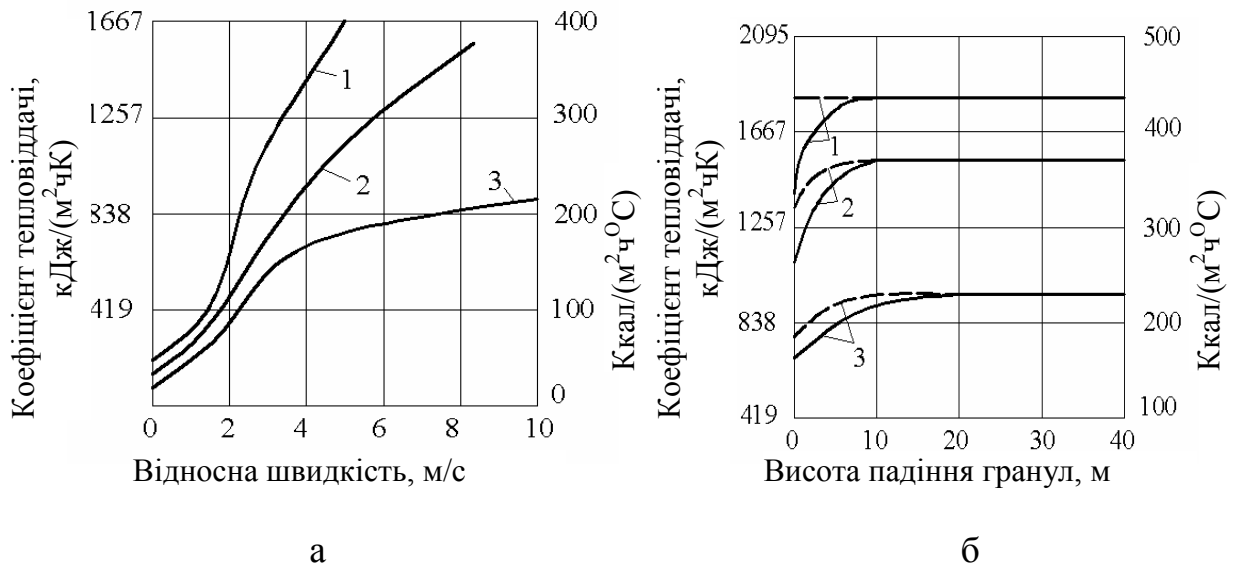


Рис. 1.4 – Залежність ефективного коефіцієнта тепловіддачі від відносної швидкості руху гранул і повітря (а), висоти падіння гранул (б), при $W_{нач}=4$ м/с, $W_B=0$ м/с (суцільні криві) і $W_B=2$ м/с (пунктирні криві):

1 - $d = 1$ мм; 2 - $d = 1,7$ мм; 3 - $d = 3$ мм.

Таким чином, необхідна висота падіння крапель (гранул) визначається їхнім діаметром, швидкістю висхідного потоку повітря й часом, необхідним для затвердіння (кристалізації) крапель плаву.

Процес теплообміну між краплею плаву й потоком повітря описується диференціальним рівнянням [73]

$$dq = \alpha(t_K - t)4\pi R^2 d\pi. \quad (1.7)$$

У цьому рівнянні коефіцієнт тепловіддачі α , температура навколишнього середовища t , температура краплі t_K змінюються із часом τ падіння краплі.

Величина α може бути знайдена із критеріального рівняння Фрессінга [7]

$$Nu = 2 + 0,55Re^{1/2} Pr^{1/3}, \quad (1.8)$$

де Re і Pr - критерії Рейнольдса й Прандтля, у яких за характерний розмір прийнятий діаметр краплі, а швидкість дорівнює відносній швидкості руху краплі в середовищі.

Для випадку, коли величину α і температуру навколишнього середовища можна прийняти постійними, час кристалізації краплі, що кристалізується без модифікаційних переходів, можна визначити за формулою Циборовського [7]

$$\tau = \frac{\rho q_0 R}{\alpha(t_0 - t)} \left(\frac{1}{3} + \frac{\alpha R}{6\lambda} \right), \quad (1.9)$$

де ρ - щільність плаву; q_0 - питома теплота кристалізації; t_0 - початкова температура краплі, дорівнює температурі кристалізації; λ - коефіцієнт теплопровідності речовини затверділої краплі; R - радіус краплі.

Недоліком цієї формули є те, що в ній не враховані модифікаційні переходи, які проходять в краплі (гранулі) зі зміною температури.

Основними гідромеханічними характеристиками киплячого шару [74] є критична швидкість, що відповідає початку псевдозрідження (w_{KP}), робоча швидкість газу (w) і перепад тиску в киплячому шарі ($\Delta p_{CЛ}$).

Швидкість початку псевдозрідження для сферичних часток можна визначити з наступних залежностей [73]

$$Re_{KP} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}, \quad (1.10)$$

$$Re_{KP} = \frac{w_{KP} d_{CP}}{v''}, \quad (1.11)$$

$$Ar = \frac{g d_{CP}^3}{(v'')^2} \cdot \frac{\rho_T g - \rho g}{\rho g}, \quad (1.12)$$

$$d_{CP} = \sqrt{d_{min} d_{max}}. \quad (1.13)$$

де Ar – число Архімеда; Re – число Рейнольдса, що відповідає критичній швидкості газу; ν – кінематична в'язкість газу; ρ_T, ρ – щільність твердого й газу; g – прискорення вільного падіння; d_{min}, d_{max}, d_{CP} – відповідно мінімальний, максимальний і середній розміри часток у киплячому шарі.

Перепад тиску в киплячій шарі може бути визначений співвідношенням

$$\Delta p_{cl} = \rho_H g h_0, \quad (1.14)$$

де ρ_H – щільність гранул; h_0 – висота нерухливого шару.

1.3 Математична модель теплообміну в гранулі

Температурне поле в гранулі описується рівнянням нестационарної теплопровідності для шару [75]

$$C' \rho' \frac{dT}{d\tau} = \frac{d}{dr} \left(\lambda' \frac{dT}{dr} \right) + \frac{2}{r} \lambda' \frac{dT}{dr}, \quad (1.15)$$

де C' і λ' – теплоємність і теплопровідність матеріалу гранули.

Необхідно враховувати тепловиділення при модифікаційних переходах на відповідних фронтах, що переміщаються із часом. Це робиться шляхом введення граничних умов стефановського типу [1,2]

$$\lambda' \frac{dT}{dr} \Big|_{r_{n+0}} - \lambda' \frac{dT}{dr} \Big|_{r_{n-0}} = L_n \rho' \frac{dr_n}{d\tau}, \quad (1.16)$$

де L_n – теплота модифікаційного переходу між n -ою і $n+1$ -ою модифікаціями.

При цьому дотримується також умова

$$\text{при } r = r_n \quad T = T_n = \text{const}. \quad (1.17)$$

Іншими граничними умовами є умови на поверхні гранули

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_{\text{ПОВ}}-0} = -\frac{\alpha}{\lambda} (T_{\text{ПОВ}} - T''), \quad (1.18)$$

де коефіцієнт тепловіддачі α можна визначити [75] для діапазону $200 < Re < 3000$ за рівнянням

$$Nu = 0.37 Re^{0.6} Pr^{1/3}, \quad (1.19)$$

у якому Nu , Re і Pr – числа Нуссельта, Рейнольдса й Прандтля відповідно; $T_{\text{ПОВ}}$ і T'' – температури поверхні гранули й повітря.

Швидкість обтікання гранул повітрям, що входить у число Re , визначається із системи рівнянь (1.5) або через отримані [72] в результаті її розв'язання залежності.

Рівняння теплового балансу між гранулою й охолоджуючим повітрям для всієї висоти польоту дає зв'язок

$$-4\pi r_{\text{ПОВ}}^2 \lambda' \int_0^{\tau_{\text{ПОВ}}} \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=r_{\text{ПОВ}}-0} d\tau = c_p'' \rho'' V_1'' (T_{\text{ВНХ}}'' - T_{\text{ВХ}}''), \quad (1.20)$$

де $V_1'' = 4V'' \rho'' g \pi r_{\text{ПОВ}}^3 / 3G_{\text{ТВ}}$; V'' – об'ємна витрата повітря; $G_{\text{ТВ}}$ – масова витрата гранул.

У центрі гранули маємо умову

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=0} = 0. \quad (1.21)$$

Початкові умови завдання можуть бути записані так

$$\text{При } \tau = 0 \quad T(r, \tau) = T(r, 0); \quad \alpha = \alpha_0^0; \quad v = v_{BX}. \quad (1.22)$$

1.4 Основні властивості гранул

Гранули аміачної селітри, які утворюються при кристалізації її розплаву, являють собою капілярно-пористе тіло. Аміачна селітра – технічний нітрат амонію – містить не менше 34,2% азоту. Твердий нітрат амонію в інтервалі температур від – 17 до 169,6 °С має п'ять кристалічних модифікацій, термодинамічно стійких при атмосферному тиску [1, 2, 77 – 79]. Кожна модифікація існує лише в певній області температур, і перехід з однієї модифікації в іншу (поліморфний перехід) супроводжується змінами кристалічної структури й об'єму кристалічної решітки. Кристалографічні характеристики модифікацій нітрату амонію надані в табл. 1.1.

Процеси переходу однієї модифікації нітрату амонію в іншу є оборотними - енантіотропними [1,2]. Вони супроводжуються виділенням (або поглинанням) тепла й стрибкоподібною зміною питомого об'єму, теплоємності, ентропії й т.д. У табл. 1.2 наведені параметри модифікаційних перетворень.

Перетворення II→IV стабільне при тиску 81,7 МПа [80]. Екстрапол яція даних роботи [80] у метастабільну область низьких тисків при зводить до цього перетворення до температури 50,5 °С при атмосферному тиску. Перехід II→ IV при 50,5 °С був експериментально виявлений у ряді досліджень, наприклад у роботі [81], проведених на добре висушених зразках.

Таблиця 1.1 – Кристалографічні характеристики модифікацій нітрату амонію

Модифікація	Температурна область існування модифікації, °С	Вид симетрії	Параметри кристалічної решітки, 10^{-10} м (Å)			Об'єм кристалічної решітки, $[(10^{-10} \text{ м})^3 \text{ або } (\text{Å})^3]$
			a	b	c	
I	169,6 - 125,2	Кубічна	4,40	4,40	4,40	85,2
II	125,2 - 84,2	Тетрагональна	5,75	5,75	4,95	163,7
III	84,2 - 32,3	Ромбічна, моноклінна	7,06	7,66	5,80	313,7
IV	32,3- (- 17)	Ромбічна, біпірамідальна	5,75	5,45	4,96	155,4
V	(- 17) - (- 50)	Тетрагональна	8,03	8,03	9,83	633,8

Термодинамічні, рівноважні температури модифікаційних перетворень нітрату амонію можна змінити лише введенням домішок неорганічних солей, які змінюють його кристалічну решітку у випадку утворення твердих розчинів або хімічних сполук. Тому волога принципово не може змінити термодинамічні температури поліморфних переходів.

Відомо, що вода впливає на кінетику поліморфних переходів. Тому при дослідженні цих процесів методом диференціального термічного аналізу (ДТА), спостережувані значення температури поліморфних переходів при нагріванні вище, а при охолодженні — нижче термодинамічних значень. Це підтверджено в роботі [2], проведеної в інтервалі температур від 25 до 170 °С при зміні вологості досліджуваних зразків від 0,03 до 3,4 %.

Таблиця 1.2 – Параметри модифікаційних перетворень

Перетворення	Температура, °C	Теплота перетворення		Зміна об'єму $10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$ ($\text{см}^3/\text{г}$)
		кДж/кг	Ккал/кг	
Плав \Leftrightarrow I	169,6	68,03	16,25	0,054
I \Leftrightarrow II	125,2	52,83	12,62	0,013
II \Leftrightarrow III	84,1	16,75	4,00	0,008
III \Leftrightarrow IV	32,3	19,89	4,75	0,022
II \Leftrightarrow IV	50,5	25,62	6,12	---

Кристалізація плаву нітрату амонію незалежно від вмісту вологи протікає через перетворення I \rightarrow II, II \rightarrow IV \rightarrow III і III \rightarrow IV [1].

Вимірний загальний [1, 2] об'єм пор і розподіл його по розмірах ефективного радіуса пор гранул аміачної селітри, чистої та з неорганічними домішками.

У табл. 1.3 наведені відомості про структуру пор аміачної селітри чистої та з неорганічними добавками. Вологість досліджених зразків становила 0,2% (за Фішером).

З таблиці 1.3 випливає, що досліджені домішки (за винятком бентоніту) у тій чи іншій мірі зменшують загальну пористість аміачної селітри. Найбільший вплив робить добавка нітрату магнію, що зменшує загальну пористість в 1,5 раза. Крім того, домішки впливають на співвідношення між об'ємами перехідних пор і макропор. Частка перехідних пор від загальної пористості зростає в порівнянні із чистою аміачною селітрою в 1,9 - 2,5 рази.

Структуру пор аміачної селітри з неорганічними добавками показано у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Структура пор аміачної селітри

№ зразка	Добавка	Загальна пористість, см ³ /г	Перехідні пори		Макропори	
			об'єм, см ³ /г	% від загальної пористості	об'єм, см ³ /г	% від загальної пористості
1	Без домішок	0,060	0,020	33,4	0,040	66,6
2	0,3% (NH ₄) ₂ SO ₄	0,052	0,044	84,6	0,008	15,4
3	0,18% ((NH ₄) ₂ SO ₄ + 0,30% P ₂ O ₅	0,047	0,040	84,8	0,007	15,2
4	1,2% Mg(NO ₃) ₂ (0,33% Mg)	0,040	0,025	62,7	0,015	37,3
5	2% бентоніту Черкаського родовища	0,063	0,048	76,2	0,015	23,8

Відомості про структуру пор аміачної селітри необхідні для розрахунку процесів масо-теплообміну й інтерпретації процесів сорбції вологи.

Аміачна селітра відрізняється високою гігроскопичністю, що є однією із причин її злежуваності [1,2].

Процес поглинання вологи з повітря розчинною твердою сіллю протікає у дві стадії. Спочатку суха сіль адсорбує вологу. Потім, у міру того, як адсорбована волога покриває всю поверхню або більшу частину поверхні кристалів, створюється плівка насиченого розчину, тиск пари над яким, відповідно до закону Рауля, завжди менше, ніж тиск насиченої пари над чистою водою при одній і тій же температурі. Якщо парціальний тиск водяної пари в повітрі більше, ніж тиск пари над насиченим розчином, то речовина буде поглинати вологу з повітря. Відносна вологість повітря, при якій речовина не зволожується й не підсихає, називається гігроскопічною точкою [1].

Гігроскопічна точка визначається за наступним рівнянням $x = \frac{p_n}{p} 100\%$, де p_n – парціальний тиск пар води над насиченим розчином речовини; p – парціальний тиск насиченої водяної пари при даній температурі; x – відносна вологість повітря, %.

Гігроскопічні точки Γ аміачної селітри при різних температурах t мають (в % відносній вологості) наступні значення [8]:

$t, ^\circ\text{C}$	10	15	20	25	30	40	50
$\Gamma, \%$	75,3	69,8	66,9	62,7	59,4	52,5	48,4

Додавання в плав аміачної селітри розчинних неорганічних солей, як правило, знижує гігроскопічну точку в порівнянні із чистою сіллю. Так, додавання 1,2% нітрату магнію знижує гігроскопічну точку при 25 °C до 57,3% [82].

Гігроскопічні властивості добрив можна характеризувати швидкістю поглинання вологи. Становило інтерес використовувати цю характеристику для з'ясування впливу різних неорганічних домішок на гігроскопічні властивості аміачної селітри. Із цією метою була вивчена [2] швидкість поглинання вологи гранулами аміачної селітри з неорганічними добавками, склад яких наведений у табл. 1.3, при початковій вологості зразків 0,2-0,3% (за Фішером):

№ зразка (див. табл. 1.3)	1	2	3	4	5
Швидкість поглинання, %/хв	0,069	0,062	0,069	0,160	0,134

З наведених даних виходить, що при введенні в аміачну селітру 1,2% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ швидкість поглинання вологи збільшується в 2,3 рази в порівнянні із чистою сіллю. Це пов'язане зі зниженням гігроскопічної точки аміачної селітри при додаванні до неї нітрату магнію.

Бентоніт, уведений у плав аміачної селітри як центр кристалізації, збільшує швидкість поглинання вологи внаслідок того, що він має велику питому поверхню (до $160 \text{ м}^2/\text{г}$) [1,2]. Однак завдяки шаруватості структури бентоніту вміст вільної вологи зменшується, що сприяє поліпшенню якості селітри. Введенням неорганічних розчинних солей у плав аміачної селітри не можна поліпшити її гігроскопічні властивості.

1.5 Способи одержання гранул пористої структури

1.5.1 Одержання пористої аміачної селітри за допомогою пороутворюючих поверхнево -активних речовин

Сутність цієї групи способів полягає в тому, що, розподіляючись рівномірно в об'ємі плаву або розчину нітрату амонію, легко паркі пороутворюючі речовини звітрюються при наступній кристалізації й сушінні продукту, у результаті чого в частках продукту утворюються порожнечі й капіляри, що підвищують його сорбційні властивості [1].

При додаванні до розчину або плаву селітри незвітрюваних поростворюючих речовин, що володіють сорбційними властивостями, пористість гранул селітри підвищується як за рахунок властивостей самої домішки, так і завдяки створенню в плаву штучних центрів кристалізації, що змінюють кристалічну структуру гранул.

Відповідно до патенту описаному [1], аміачну селітру насипною щільністю 500 кг/м^3 одержують, змішуючи кристалічний нітрат амонію із чотирьохлористим вуглецем, після чого отриманий вологий продукт розмелюють у кульовому млині. При цьому із суміші звітрюється чотирьохлористий вуглець і виходить готовий пористий продукт.

В інших випадках у якості поростворюючого компонента пропонується додавати до селітри порошкоподібну кремнієву кислоту або силікоаерозоль, одержуючи при цьому пористу аміачну селітру щільністю 790 кг/м^3 [2].

Пористу селітру насипною щільністю 750 кг/м^3 одержують також [1], змішуючи гранульовану аміачну селітру з фенолформальдегідною смолою й висушуючи суміш при температурі $70 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 8 год. У якості поростворюючої домішки в плав аміачної селітри перед грануляцією вводять діатомитову землю ($0,5 \div 4,0 \%$), карбамід (1%) або добре дисперговану суміш цих компонентів [1]. Поростворюючими добавками можуть також служити деякі поверхнево-активні речовини (ПАР) - такі, як солі жирних кислот (алкілбензолсульфоокислоти, алкілнафталінсульфоокислоти). Їхня структура характеризується довжиною вуглеводного ланцюга.

Обробка поверхні часток аміачної селітри ПАР змінює її структуру, створюючи більш сприятливі умови для сорбції рідкого палива. Для додання гранулам нітрату амонію підвищеної пористості їх рекомендується обприскувати водою або розчином ПАР ($0,3 \div 3 \%$) з наступним сушінням при температурі 100°C протягом 1 год [1]. Спосіб одноразового або багаторазового зволоження поверхні гранул селітри пропонується й в інших патентах, які описані [1] для одержання продукту насипною щільністю 750 кг/м^3 , збільшеною пористістю й хорошими сорбційними властивостями.

Додання до кристалів аміачної селітри $0,1\%$ і більше [1] ПАР призводить до обволікання кристалів цією речовиною, перешкоджаючи їхньому зрощуванню, сприяє створенню порожнеч між кристалами й підвищенню сорбційних властивостей продукту. Навіть при значно менших добавках ПАР (наприклад, $0,01 \div 0,02 \%$ лаурил-сульфату натрію) пористість гранул значно збільшується з одночасним зменшенням вмісту вологи в готовому продукті після його сушіння. У цьому випадку добавка ПАР зменшує поверхневий натяг води й тим самим полегшує сушіння гранул селітри, у яких кристали NH_4NO_3 склеюються між собою, а парка вологи утворить щілини, що створюють пористість продукту. На 1 т розчину нітрату амонію в її плав рекомендується вводити 1000 – 1500 мл 20%-вого водяного розчину ПАР.

Вплив домішки лаурил-сульфату натрію на вологість і сорбційну здатність продукту показана в таблиці 1.4:

Таблиця 1.4 – Вплив домішки лаурил-сульфату натрію на вологість і сорбційну здатність

Вміст домішки, %	Сорбційна здатність, %	Вологість після сушіння, %
0,0	9 - 10	0,25
0,19	9,4	0,10
0,021	12,6	0,09
0,026	14,7	0,07

Пористість і сорбційна здатність гранул селітри особливо сильно збільшуються після повторної обробки гранул поверхнево-активною речовиною. При зрошенні поверхні гранул 40 %-вим водяним розчином важкого алкіл-аріла на транспортері після грануляційної вежі й наступного сушіння продукт мав насипну щільність 510 кг/м^3 , сорбційну здатність 21,6 % і пористість 41,1 % [2].

1.5.2 Одержання пористої аміачної селітри шляхом висушування її гранул або кристалів

Цей спосіб заснований на тім, що в гранулах або кристалах аміачної селітри в процесі їхнього сушіння протікає процес поростворення. Волога видаляється різними способами: в апаратах, що працюють при розрідженні, в обертових послідовно включених барабанах або в апаратах із псевдозрідженим шаром.

Розпорошуючи нагрітий до точки кипіння $85 \div 95$ %-ний розчин аміачної селітри в теплоізолюваній камері, у якій підтримується розрідження близько 20 кПа (150 мм рт.ст.), одержують пористу селітру насипною щільністю 500 кг/м^3 [1]. Іншим способом [1] упарений у вакуум-апараті розчин аміачної селітри при

130 °С переводять у вакуум-кристалізатор, у якому плав витримують протягом 20 хв при зниженому до 2 кПа (15 мм рт. ст.) тиску і прохолоджують при 30 °С. Отриманий продукт має насипну щільність близько 300 кг/м³.

У французькому патенті, описаному [1] для одержання пористої аміачної селітри, рекомендується виділяти з 73 – 75%-вого розчину нітрату амонію кристали й потім висушувати їх під вакуумом. Пористий продукт можна одержати, випаровуючи під вакуумом без перемішування гарячий розчин аміачної селітри, що після видалення вологи перетворюється в затверділу спінену масу.

Розроблений безперервний спосіб одержання кристалів аміачної селітри з низькою щільністю шляхом кристалізації 73 ÷ 75%-ного розчину нітрату амонію у вигляді голчастих кристалів на поверхні обертового барабана частково зануреного в корито з розчином. Кристали, що видаляються з поверхні барабана, висушують під вакуумом при 60 °С. Спосіб вакуумного сушіння для одержання пористої аміачної селітри пропонується також у японському патенті, описаному [1], відповідно до якого розчин нітрату амонію, насичений при 90 ÷ 100 °С, надходить у першу вакуумну камеру, а з неї при температурі близько 120 °С форсункою впорскується в другу камеру, що перебуває під більш глибоким вакуумом, у якій при температурі близько 50 °С відбувається висушування плаву селітри до вмісту в ньому приблизно 0,07% вологи. Пористі гранули селітри мають насипну щільність 400 ÷ 500 кг/м³.

В 1867р. шведські інженери Н. Ольсон і П. Норбі запропонували застосовувати в якості найпростіших вибухових речовин суміші аміачної селітри із твердими або рідкими горючими речовинами [1]. Для досягнення найбільшої ефективності дії таких вибухових речовин необхідно у всій масі гранули створити гарний контакт між частками аміачної селітри й органічною домішкою.

Встановлено [1,2], що насипна щільність гранульованої аміачної селітри в межах 750 ÷ 850 кг/м³ є оптимальною при використанні селітри для

виготовлення вибухових речовин найпростішого типу. Суміші, виготовлені на основі аміачної селітри щільністю менше 750 кг/м^3 , мають знижену інтенсивність вибуху, а щільністю більше 1000 кг/м^3 погано всмоктують рідке паливо й створюють із ним неоднорідні суміші.

Відомий спосіб [1] одержання пористої гранульованої аміачної селітри, що полягає в тім, що плав селітри гранулюють звичайним способом, а вихідні із грануляційної вежі гранули після розсіву сушать у псевдозрідженному шарі й одержують продукт насипною щільністю $780 \div 800 \text{ кг/м}^3$. Селітру змішують з рідким паливом безпосередньо перед вживанням у якості вибухової речовини в кар'єрах.

Також запатентований спосіб одержання пористої аміачної селітри, описаний у роботі [1], за яким плав концентрацією $96 \div 99,1 \%$ гранулюють у вежі й отримані гранули змочують водою, а потім сушать повітрям при температурі близько $140 \text{ }^\circ\text{C}$, одержуючи продукт насипною щільністю $650 \div 750 \text{ кг/м}^3$.

Англійський патент, описаний у роботі [1], рекомендує змішувати гранульовану або кристалічну аміачну селітру приблизно з 10% води протягом короткого часу, достатнього для того, щоб тільки змочити поверхню гранул. Замість води можна застосовувати концентрований розчин нітрату амонію. Зволожену суміш висушують при температурі повітря на вході в сушарку близько $120 \text{ }^\circ\text{C}$. Для зниження розчинності селітри на поверхні гранул до зволоженої суміші перед її сушінням додають дрібну фракцію сухих гранул. Насипна щільність отриманого продукту становить $730 \div 770 \text{ кг/м}^3$.

Оптимальна концентрація плаву для одержання пористої гранульованої аміачної селітри способом сушіння лежить у межах $96 \div 97\%$. Сорбційна здатність готового продукту становить при цьому $18 \div 20 \text{ г/100 г}$ і пористість $27 \div 30 \%$, у той час як з 98% -ного плаву виходять гранули з більш низькою сорбційною здатністю - близько 16 г/100 г . Гранули, одержувані із плаву

концентрацією 99,5 %, після сушіння мають низьку пористість і дуже погано всмоктують рідке паливо [1,2].

1.5.3 Одержання пористої аміачної селітри шляхом термообробки її гранул

Термічні способи, засновані на властивостях кристалічної решітки нітрату амонію, зазнають поліморфних перетворень при певних температурах, що протікають із зміною об'єму кристалів. За певних умов гранули трохи збільшуються в об'ємі й стають менш щільними й більш пористими.

Відповідно до французького патенту, описаному в роботі [1], процес одержання гранульованої пористої аміачної селітри проводиться в такий спосіб: плав концентрацією 99,7% NH_4NO_3 при температурі 178 °С розбризкується в грануляційній вежі, причому процес охолодження точки плаву у вежі регулюється так, щоб гранули виходили з неї при 100 ÷ 110 °С. Потім їх охолоджують в обертових барабанах або у псевдозрідженому шарі до температури нижче 32 °С і знову нагрівають до температури вище 84 або 124 °С. Підігрів гранул може проводитися або в лопатевій мішалці з паровою сорочкою, або в сушарці потоком повітря, нагрітим до 140 °С. Гарячі гранули селітри, що вийшли із сушарки, знову охолоджуються повітрям до температури нижче 32 °С в охолоджувальних барабанах і цикл нагрівання-охолодження повторюють кілька разів, після чого одержують пористі гранули насипною щільністю 772 кг/м³, сорбційною здатністю 10%, пористістю 21,8%.

Відповідно до іншого французького патенту, описаному в роботі [1], для більш глибокого просочення гранул рідким паливом рекомендується нагрівати й охолоджувати гранули в суміші з рідким паливом, доводячи температуру суміші до температури, близької до температури алотропних перетворень. Потім суміш охолоджують і цикл нагрівання - охолодження повторюють.

Спосіб термообробки іноді сполучать зі зволоженням гранул розчином ПАР або водою, а також з додаванням у плав тонко здрібнених речовин, що не розчиняються в ньому. Це дозволяє, варіюючи температури нагрівання й

охолодження й циклічність зволоження гранул розчином ПАР, одержувати продукт із заданими якісними показниками.

У патенті США описаному в роботі [1], передбачається додавання в плав перед грануляцією від 0,2 до 4,0% каоліну, діатомитової землі, силікату кальцію, окису магнію, окису цинку й інших мінеральних речовин. Підтримуючи температуру плаву тільки на 11 °С вище точки плавлення, можна загальмувати протікання небажаних реакцій між нітратом амонію й окисом магнію. Внесення в плав зазначених домішок поліпшує сорбційні властивості кінцевого продукту й, крім того, зменшує втрату міцності гранул і їх руйнування при термообробці й переходах з однієї кристалічної модифікації в іншу.

Для процесу термообробки велике значення має вміст води в гранулах. Оптимальною вважають вологість гранул $0,3 \div 1,0\%$. Відомо [1,2], що швидкість фазових перетворень нітрату амонію з дуже низьким вмістом води мала. Тому при вологості гранул $0,2 \div 0,3\%$ їх доводиться піддавати шести циклам термообробки, щоб одержати пористий продукт. При вологовмісті $0,3 \div 1\%$ число необхідних циклів зменшується до $2 \div 4$.

Швидкість поліморфних перетворень може бути підвищена шляхом додавання до розчинів аміачної селітри від 0,1 до 3% таких розчинних у воді солей, як KNO_3 , FeSO_4 , $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$.

У процесі термообробки гранули селітри стають менш міцними, ніж до термообробки. Ослаблення механічної міцності гранул перебуває у прямій залежності від числа циклів термообробки, яким вони піддавалися. Крім того, велике значення має присутність у селітрі тих або інших домішок [1]. Швидше всього втрачають міцність гранули аміачної селітри, які не утримують сторонніх домішок. У цьому випадку досить $4 \div 5$ циклів термообробки ($20 \Rightarrow 50^\circ\text{C}$), щоб гранули такої селітри повністю руйнувалися. Неміцні гранули пористої аміачної селітри, проходячи через різні транспортні й змішувальні

пристрої, частково руйнуються, підвищуючи вміст пилоподібних часток у продукті, що ускладнює його подальше використання.

Для підвищення міцності гранул пористої аміачної селітри до її розчину в процесі виробництва додають $0,4 \div 0,8$ % сульфату амонію, а до отриманого із цього розчину плаву додають розчин нітрату кальцію з розрахунку введення $0,1 \div 0,4$ % CaO [1,2]. У результаті спільної присутності цих компонентів у плаву нітрату амонію утвориться сульфат кальцію, який, надаючи цементуючу дію, зменшує втрату міцності гранул при подальшій їх термообробці.

1.6 Висновки до першого розділу, постановка завдання досліджень

В описаних в попередньому розділі відомих способах структура одержуваних гранул не відповідає вимогам, поставленим до сучасних пористих матеріалів.

Так одержувані баштовим методом, гранули являють собою кристалізовані краплі плаву, що мають у центрі порожнину - результат випарювання залишкової вологи. Така структура гранул знижує споживчі властивості продукту як основи для вибухових речовин, тому що в такій гранулі має місце наявність монолітної речовини й сконцентрованого в єдину порожнину вільного простору в центрі гранули, що не дозволяють зробити скільки-небудь близьку до рівномірного просочення гранули горючим компонентом.

Гранули, отримані в киплячому шарі й методом напилювання й обкочування в барабанах-грануляторах мають монолітну структуру з випадковими незначними порожнечами в місцях налипання розпиленого плаву.

Відомі способи одержання гранул пористої структури, таких як введення пороутворюючих домішок і випаровування вологи із плаву при висушуванні гранули, термообробка, супроводжувана модифікаційними переходами з перебудовою структури кристалів хоча й створюють додаткові порожнечі в

гранулі, але при труднощах контролю процесів пороутворення або міжкристалічного розтріскування не забезпечують всіх вимог, пропонованих до ПАС і знижують міцнісні властивості гранул.

Але один загальний для всіх і найбільш істотний недолік - у рамках цих способів неможливо впливати на пористість, міцність, тобто одержувати гранули із заданими властивостями.

У такий спосіб для одержання гранул пористої структури, що відповідає всім вимогам, пропонованим до ПАС необхідні спеціальні методи гранулювання й апаратурне оформлення, що дозволяють одержувати гранули із заданими властивостями.

В основу нових грануляторів покладений спосіб гранулювання з розплавів, розчинів і суспензій, заснований на вдосконаленні динаміки руху потоку гранул, що забезпечує збільшення монодисперсності гранул, які ростуть у вихровому шарі, і однорідності гранулометричного складу готового продукту.

Розробка сучасних конструкцій грануляторів для одержання гранул із заданою структурою і властивостями і впровадження їх у промисловість стримується через відсутність математичного опису процесу утворення пор, що призводить до невизначеності при розробці умов проведення процесу гранулоутворення, термодинамічних і гідродинамічних параметрів устаткування. Різними дослідниками здійснювалися спроби, на основі експериментальних даних, одержати математичні вираження, які дозволяли б робити необхідні розрахунки. Але отримані емпіричні формули не розкривають фізичної картини процесів, які протікають у гранулі й мають обмежені області застосування. У той же час математичні методи моделювання процесу формування гранул необхідної структури ще не доведені до завершення й вимагають подальшої доробки під конкретні умови й удосконалювання. У зв'язку з цим на цей час відсутні розрахункові методики, що дозволяють описувати процеси гранулювання в апаратах подібного типу й здійснювати їх конструювання під конкретні умови й завдання.

Процеси протікають у вихровому потоці газу, що значно інтенсифікує тепло- й масообмінні процеси. З іншого боку, наявність такої складної взаємодії розвиненого тривимірного газового потоку із гранульованим продуктом призводить до необхідності додаткового як теоретичного так і експериментального вивчення наступних фізичних явищ:

- рух вихрового газового потоку в робочій камері вихрового гранулятора, що має форму відмінну від циліндричної [8];

- взаємодія гранул з вихровим потоком газу, опис їх руху зі зміною маси гранул при утворенні пористості;

- вплив термодинамічних характеристик потоку газу на процеси, які протікають у гранулі й призводять до утворення пор;

- вплив фізико-хімічного складу гранул, їх вологовмісту на механізм пороутворення й ін.

Дана робота спрямована на розвиток і вдосконалювання фізичної й математичної моделі процесу, а так само на створення інженерної методики розрахунку грануляторів.

Основні завдання досліджень опубліковані в роботі [19].

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Загальна методика проведення досліджень

Основна мета досліджень – створення науково обґрунтованої методики розрахунку термодинамічних та гідродинамічних чинників в робочій зоні грануляційного пристрою, які впливають на утворення заданої пористої структури у гранулі, а також на інші властивості гранули (міцність, вбираюча здатність гранул стосовно рідкого палива, пористість гранул).

Для досягнення поставленої мети проведено математичне моделювання термодинамічних та гідродинамічних умов в робочій зоні гранулятора, експериментально досліджено термодинаміку та гідродинаміку в статичних та динамічних умовах, проведено дослідження тривалості зволоження гранул до необхідного значення, проаналізовано результати та розроблено методику термодинамічного розрахунку необхідних параметрів в робочій зоні пристрою для утворення гранул з необхідними властивостями.

Під час теоретичних досліджень застосовано систему математичних розрахунків Maple 9 [8]. Побудову теоретичних залежностей виконано диференціальними методами математичного аналізу та інтегрального обчислення.

2.2 Методи і засоби математичного моделювання

Математичне моделювання здійснювалось на базі класичних положень термодинаміки та гідродинаміки. Розв'язування рівнянь математичної моделі здійснено за допомогою комп'ютерної системи математичних розрахунків Maple 9 [8].

2.3 Експериментальна установка для визначення часу перебування гранул у вологому середовищі

Для насичення повітря вологою був використаний існуючий барботер, конструкція якого показана на рис. 2.1.

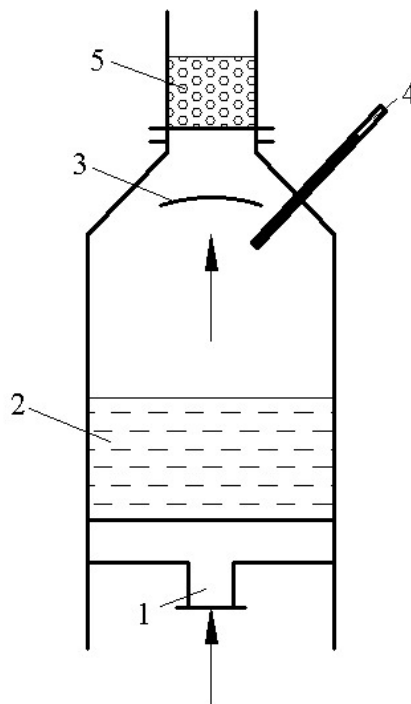


Рис. 2.1 – Барботер: 1 - вхід повітря; 2 - шар рідини; 3 - краплевідбійник; 4 - психрометр; 5- шар матеріалу, що зволожується.

Принцип роботи установки наступний: у штуцер 1 подається повітря з атмосфери заданої температури й у заданому обсязі, пройшовши через шар рідини 2, повітря насичується вологою до певного значення, що фіксується за допомогою психрометра 4, далі вологе повітря проходить через шар матеріалу, що зволожується 5, і викидається в атмосферу. Діаметр апарата у місці, де знаходиться шар рідини складає 300мм. Діаметр апарата у місці, де знаходиться шар матеріалу, що зволожується 100 мм.

2.4 Експериментальна установка для проведення дослідження в статичних умовах

Для проведення експериментальних досліджень утворення пористої структури в гранулі аміачної селітри була розроблена та виготовлена сушильна установка (рис. 2.2), у корпусі (1) якої встановлені два тени (2,3), один із яких (основний) потужністю 1000 Вт і другою потужністю 200 Вт (допоміжний). Наважка досліджуваного матеріалу (8) містяться на підставку (9), штанги якої, пройшовши крізь днище корпусу (1), установлені на електронні ваги (4), що забезпечують безперервне зважування з точністю 0,01гр. Контроль і регулювання температури забезпечують два контактних термометри (5), за допомогою яких задається необхідна мінімальна й максимальна температура в робочій зоні.

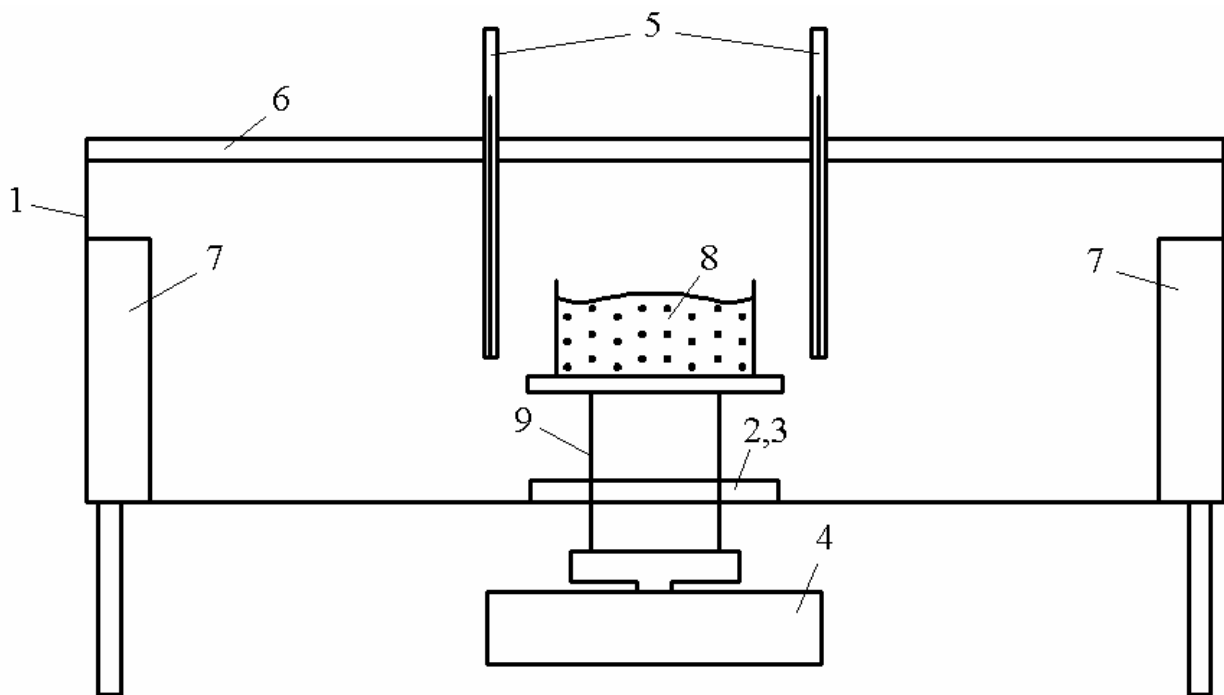


Рис. 2.2 – Схема експериментальної установки для проведення досліджень у статичних умовах

1 - корпус; 2, 3 - тени; 4 - електронні ваги; 5 - контактні термометри; 6 - кришка; 7 - вентилятори; 8 - досліджуваний матеріал; 9 - підставка.

Основна частина експериментального стенду наведена на рис. 2.3.



Рис. 2.3 – Дослідний зразок експериментальної установки для проведення досліджень у статичних умовах

Термометри встановлені в кришці установки (6) і можуть опускатися на будь-яку глибину, вони підключені до блоку керування тенами. Тени підключені паралельно, що дозволяє включати їх по черзі або одночасно. Для більш швидкого рівномірного розподілу температури усередині установки передбачені два вентилятори (7) для вирівнювання поля температур, які включаються в ручному режимі.

2.5 Експериментальна установка для проведення досліджень в умовах псевдозрідженого шару

Для проведення експериментальних досліджень утворення пористої структури в гранулі аміачної селітри й визначення часу сушіння в умовах псевдозрідженого шару, була розроблена та виготовлена експериментальна установка, схема якої подана на рис. 2.4.

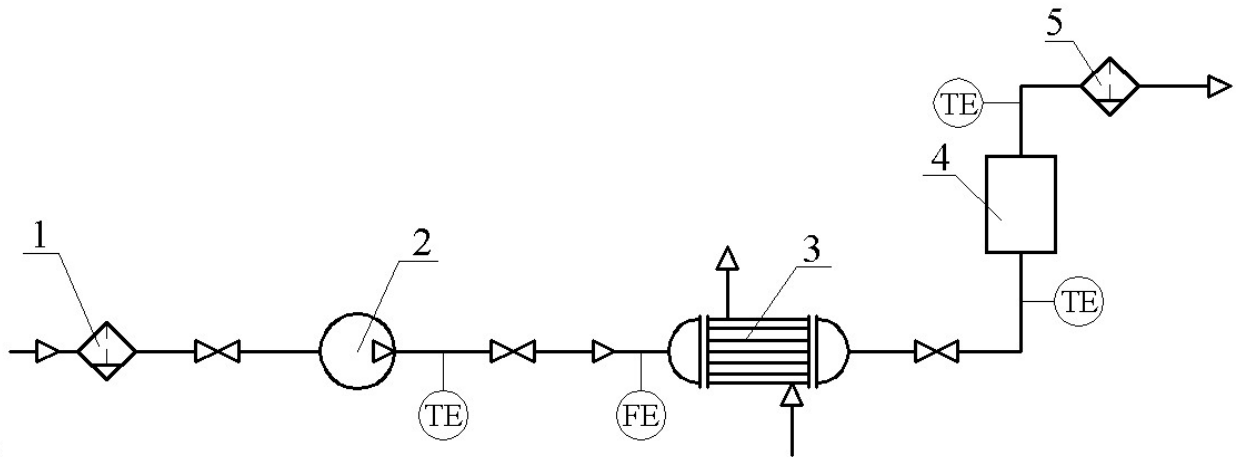


Рис. 2.4 – Схема експериментальної установки для проведення досліджень в умовах теплоносія, що рухається:

1 - фільтр; 2 - газодувка; 3 - теплообмінник; 4 - апарат з киплячим шаром; 5 - очищувальний фільтр.

Основна частина експериментального стенду наведена на рис. 2.5.



Рис. 2.5 – Дослідний зразок експериментальної установки для проведення досліджень в умовах теплоносія, що рухається

Дана установка дозволяє при діаметрі апарата 250 мм і завантажуванню вагою навішування гранул аміачної селітри 50 – 100 гр змінювати швидкість повітря в діапазоні 0,01– 0,025 м³/с, в інтервалі температур 40 – 105 °С.

Повітря з атмосфери всмоктується повітродувкою 2 через фільтр 1 і, пройшовши теплообмінник 3, нагрівається до заданої температури в межах 40 – 105°C. Далі повітря подається в апарат з киплячим шаром 4, у якому він проходить через шар гранул аміачної селітри. Після апарата з киплячим шаром повітря, пройшовши очищувальний фільтр 5, викидається в атмосферу. У схемі передбачені наступні вузли для контролю температури після газодувки 2, перед і після апарата 4, позначені на схемі ТЕ. Вузол виміру витрати повітря встановлений перед теплообмінником 3 і позначений на схемі FE.

Вищезазначені прилади контролю пройшли відповідні випробування згідно з методиками [84]. Методика проведення замірів та опис замірів спирався на рекомендації [85].

2.6 Методика проведення експериментальних досліджень

Фізичні експерименти проведено шляхом експериментальних досліджень на лабораторних установках та виконані на базі використання математичного апарату планування експерименту.

2.7 Методика обробки результатів експериментальних досліджень. Оцінка впливу похибок замірів на результати досліджень

Визначення похибки вимірів та результатів розрахунку основних термодинамічних та гідродинамічних характеристик в робочій зоні експериментальних апаратів базується на загальноприйнятих методиках та рекомендаціях [85-86] щодо проведення інженерного експерименту та обробки отриманих даних.

Для визначення оптимально необхідної кількості дослідів та досягнення найвищої достовірності й точності одержаних результатів, а також обробки цих результатів застосовувались методи математичної статистики [87, 88].

В ході проведення експерименту можуть виникати два роди помилок – випадкова та систематична [86].

Випадкова помилка знижує точність результатів, отриманих під час експерименту. Аналіз таких помилок можливий при середньоквадратичному відхиленні σ , що обчислюється за наступною формулою [86]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}, \quad (2.1)$$

де \bar{x} - середнє арифметичне значення; x - значення одиночного параметра; n – число вимірів.

Найбільш можлива помилка окремого виміру визначається за правилом трьох сигм [86, 89]:

$$\Delta = 3\sigma. \quad (2.2)$$

Двосторонній довірчий середнього арифметичного значення ε визначали залежністю [89] за умови ймовірності його влучення в довірчий інтервал 95%:

$$\varepsilon = t_p \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2.3)$$

де t_p - критерій Стьюдента [86, 87].

Середньоквадратична погрішність непрямих вимірів [89]:

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x} \cdot \Delta \cdot x_i \right)^2}, \quad (2.4)$$

де $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Точність отриманих рівнянь регресії визначено за методикою найменших квадратів [86].

Систематична помилка зміщує в однаковій мірі всі показання величин, які контролюються під час проведення експерименту. Для виключення помилки такого роду всі прилади, що використані під час дослідження, пройшли тарування за допомогою зразкових приладів в умовах протікання експерименту.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМО-Й ГІДРОДИНАМІЧНИХ УМОВ СТВОРЕННЯ ПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ В ГРАНУЛІ

3.1 Опис пропонованої фізичної моделі й постановка завдання теоретичних досліджень термодинамічних впливів на гранулу

Основним завданням даної роботи є одержання пористої структури у вже сформованій гранулі. Відповідно до описів наведених в різних літературних джерелах [1, 2, 77] гранула являє собою сферичне тіло, насиченого вологою і складається з основної речовини NH_4NO_3 .

Основний напрямок створення пористої структури у вже сформованій гранулі ґрунтується на способах, в основі яких лежить видалення вологи або інших газоутворюючих домішок з матеріалу гранули. Причому цей процес повинен протікати дуже інтенсивно, щоб волога, що видаляється, у вигляді пари або газів (якщо це газоутворюючі домішки) при виході із гранул утворювала пори, тобто розгалужену мережу капілярів [1,2].

Таким чином, можна припустити, що об'єм пор буде порівнянний з видаленими парами вологи. Проте слід врахувати, що пари вологи, що видаляються, з шарів розташованих ближче до центра гранули віддалятимуться за межі гранули через пори, що утворилися, які були отримані внаслідок видалення вологи з більш видалених шарів від центра гранули [1].

У загальному вигляді цей процес одержання пористої структури можна розбити на наступні стадії:

- насичення (зволоження) гранули рідким наповнювачем. Найпростіший спосіб - це зволоження гранул водою. На цій стадії необхідно визначити такі параметри, як: вологовміст повітря навколо гранули й час перебування гранули у вологому середовищі (від цього залежить вологовміст гранул, розподіл

вологи уздовж радіуса гранули, а так само й зменшення міцності гранули й, як наслідок, можливе її руйнування);

- транспортування вологих гранул у зону видалення вологи, що і є зоною формування пористої структури в гранулі;

- видалення гранул із зони формування пористої структури. Надалі зону формування будемо називати «робочою областю».

Як показують дослідження різних авторів [1, 3], термодинамічні й гідродинамічні умови (температура, швидкість газового потоку оточуючого гранули, час контакту гранул з гарячим газовим (повітряним) середовищем) є основними факторами формування пористої структури. Крім того, після видалення основної кількості вологи й утворення пор, гранулу необхідно якийсь час піддати процесу сушіння для забезпечення необхідної міцності гранул. У протилежному випадку гранули можуть істотно втратити свою міцність.

Таким чином, основними завданнями теоретичного опису формування гранул пористої структури є розробка методу розрахунку, що дозволить визначити кількість тепла, що підводиться до гранули, необхідне для переходу основної частини вологи, яка міститься усередині, в пароподібний стан (що приводить до утворення пор) для чого необхідно провести аналіз розподілу температур усередині гранули уздовж її радіуса з часом.

Крім цього, у розрахунках необхідно також передбачити визначення мінімального часу на сушіння гранули, значення якого за своєю величиною перевищує час, який потрібний на прогрів гранули до необхідної температури.

Гранула являє собою кулясте тіло з порами (рис. 3.1), характерним розміром якого є радіус гранули R і з погляду урахуванням фізико-хімічних властивостей у розрахунках - склад речовини гранули (у тому числі вологовміст).

З метою опису впливу термодинамічних параметрів потоку газу на зволожену гранулу була розроблена фізична модель, в основу якої покладені наступні допущення:

- для всієї сукупності гранул, що перебувають у робочій зоні деякий діаметр гранул є визначальний, тобто формування пористої структури гранул, які мають такий діаметр, в основному й визначає пористу структуру всього потоку гранул;

- гранула обмивається потоком газу (повітря), що має постійну температуру. Звідси з достатнім ступенем точності можна припустити, що температура поверхні гранули за увесь час перебування в робочій зоні буде постійною;

- у зв'язку з тим, що гранула має малі розміри від 1 мм до 4 мм, а більшу частину промислового виробництва становлять гранули розміром від 2 мм до 3 мм [72], можна припустити, що у зв'язку з гігроскопічністю гранул процес зволоження гранул необхідно зводити до мінімуму, а це дозволяє припустити, що насичення вологою відбувається за лінійним законом уздовж радіуса;

- основна маса вологи, що перебуває усередині гранули, переходить у пароподібний стан, передаючи елементарному об'єму dV , що перебуває усередині гранули і яка має масу dm кількість тепла $dQ = i dW$ (де i - питома теплота паротворення, W - маса вологи в елементарному об'ємі dV). При цьому до виділеної маси вологи вже підведено тепло в кількості $dQ_k = C(tk - tn)dm$ (де C - теплоємність; tk і tn - температура кінцева й початкова температура, при якій починається процес обробки гранули);

- пороутворення починається послідовно від верхнього шарі й фронт пороутворення рухається уздовж радіуса гранули до її центра, являючи собою сферичну поверхню;

- волога, що випаровується, безперешкодно видаляється із гранули через утворені пори в попередніх шарах речовини (ці шари розташовуються ближче до поверхні гранули) з якого складається гранула.

- об'єм утворених у гранулі пор порівнянний з об'ємом пар вилученої вологи, що підтверджується даними інших досліджень [79] і непрямим

обґрунтуванням чого може служити те, що утримуюча здатність гранул більше значення вологовмісту.

Таким чином, виходячи з перерахованих вище допущень, для розробки методики розрахунку визначення термодинамічних умов створення пористої структури в гранулі, необхідно визначити кількість тепла необхідного для підведення до гранули для видалення основної частини вологи.

Схема впливу газового потоку на краплю наведена на рис. 3.1. Виходячи із цієї схеми й допущень, що вище наводяться, можна записати математичні вирази для визначення основних гідро-й термодинамічних параметрів, вплив яких на гранулу дозволяє створити в ній пористу структуру.

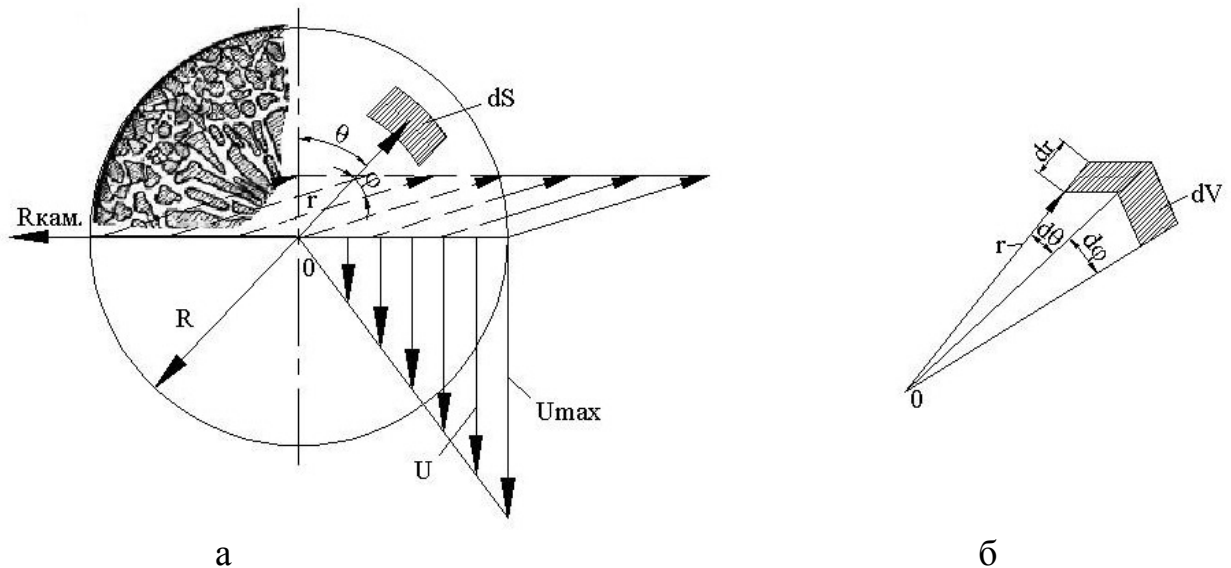


Рис. 3.1 – Схема розподілу вологи в гранулі й вплив газового потоку на гранулу: а - основні геометричні параметри гранули; б - до визначення величини елемента об'єму dV усередині гранули.

3.2 Аналіз теплового впливу навколишнього потоку на гранулу

Виходячи з вищевказаних припущень, вважаємо гранулу суцільним кулястим тілом. Розподіл температур у такому тілі описується диференціальним рівнянням [90]:

$$\frac{d}{d\tau}(rT(r, \tau)) = a \left(\frac{d^2}{dr^2}(rT(r, \tau)) \right), \quad (3.1)$$

де r - поточне значення радіуса, а - коефіцієнт теплопровідності.

Початкова умова наступна:

$$\tau = 0, T(r, 0) = T_0.$$

Розв'язком цього рівняння буде:

$$T(r, t) = T_C - (T_C - T_0) \left(\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2(\sin(\mu_n) - \mu_n \cos(\mu_n)) R \sin\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) e^{-\left(\frac{\mu_n^2 a t}{R^2}\right)}}{(\mu_n - \sin(\mu_n) \cos(\mu_n)) r \mu_n} \right) \right). \quad (3.2)$$

Даний вираз дозволяє провести аналіз часу перебування гранул у гарячому потоці газу (повітря), що має температуру 100°C , з метою досягнення заданої температури, аж до повного прогріву гранули до центра. На рис. 3.2. приводиться приклад розрахунку розподілу температур для гранули діаметром 2 мм, і часу прогріву 4, 5, 6 сек. Тут перша лінія відповідає тривалості прогріву 4 секунди, друга - 5 сек., а третя - 6 секунд.

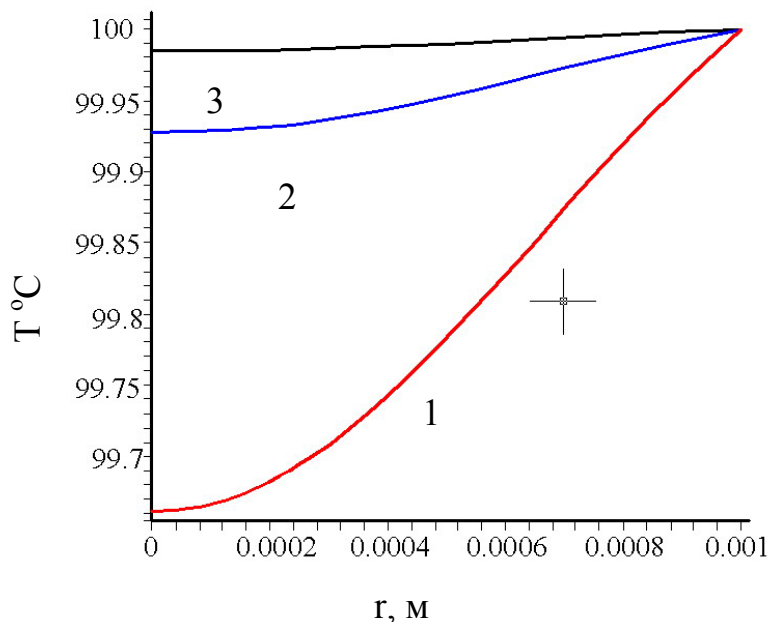


Рис 3.2 – Розподіл температур для гранули діаметром 2 мм. 1, 2, 3 – розподіл температур через відповідно 4, 5, 6 сек. після миттєвого повного нагрівання поверхні стінки гранули до $T = 100^\circ\text{C}$, при цьому початкова температура гранули 20°C .

Розрахунки проводилися для гранул аміачної селітри радіусом 1 мм із умови, що основна маса речовини, з якої складається гранула - це NH_4NO_3 теплоємністю $C_p = 1,625$ кДж/кг·К, щільністю $\rho = 0,7$ кг/м³.

Виходячи з того, що нас цікавить час прогріву гранули практично до центра, прийнявши розрахунковий радіус 0,00001 м, тобто дуже близько до центра, можна простежити, як змінюється температура (як відбувається прогрів) на цьому радіусі в часі, що показано на рис. 3.3.

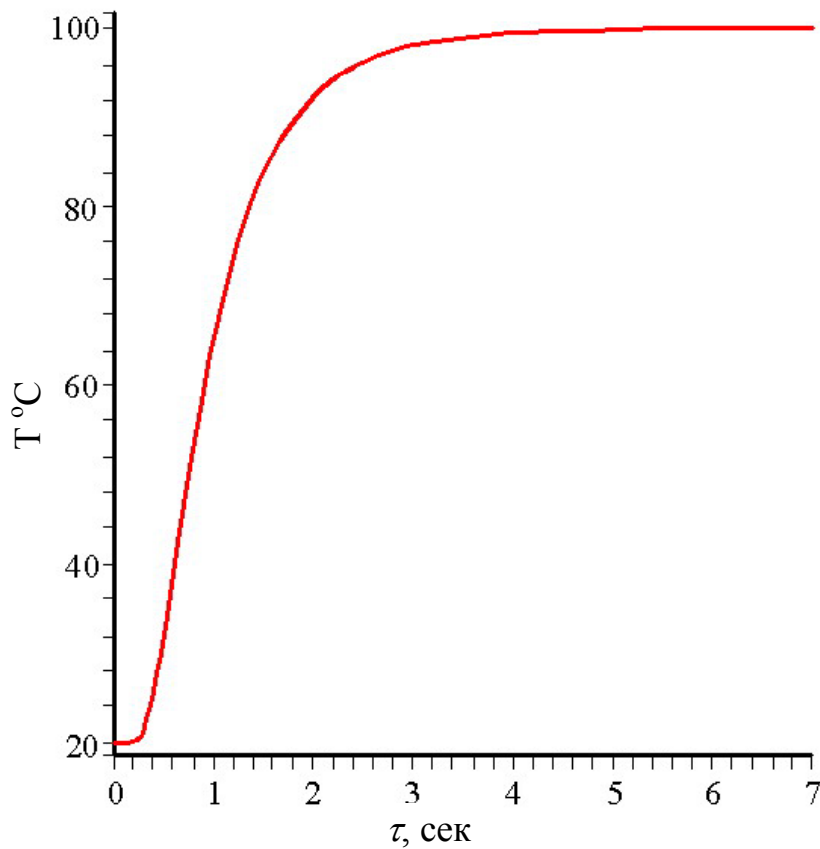


Рис. 3.3 – Зміна температури в часі гранул радіусом 1 мм.

Як видно з наведених рисунків, вже при $\tau = 3 \div 4$ секунди практично досягається повний прогрів гранул радіусом 1 мм до температури навколишнього середовища.

Аналогічні залежності можна одержати для гранул радіусом 2 мм, що показано на рис 2.4.

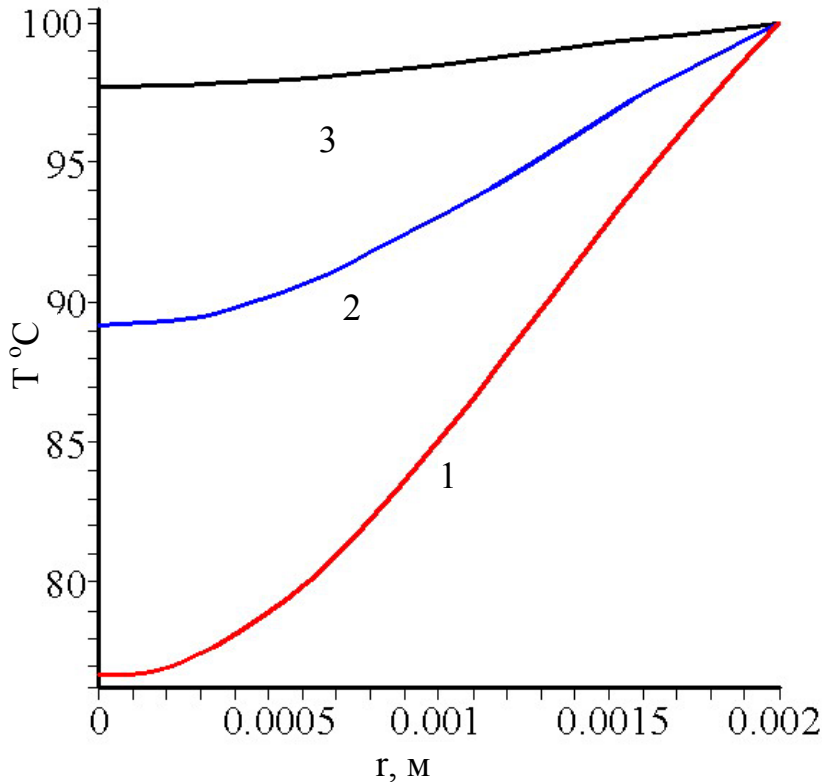


Рис. 3.4 – Зміна температури в часі вздовж радіуса гранул радіусом 2 мм.

1, 2, 3 – розподіл температур через відповідно 4, 5, 6 сек. після миттєвого повного нагрівання поверхні стінки гранули до $T = 100$ °С, при цьому початкова температура гранули 20 °С.

Прийняті для розрахунку тимчасові відрізки істотно більше, майже в 2 рази, що пояснюється збільшенням радіуса гранули вдвічі.

Як показують отримані розрахунки, збільшення радіуса гранули вдвічі спричиняє збільшення часу до повного прогріву гранули так само приблизно в 2 рази.

Аналогічні розрахунки можна провести й для процесу охолодження, але для цього потрібно використовувати інше диференціальне рівняння [90]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} T(r, \tau) = a \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} T(r, \tau) \right) + \frac{2a \left(\frac{\partial}{\partial r} T(r, \tau) \right)}{r}. \quad (3.3)$$

$$\tau = 0, T(r, 0) = T_0.$$

Рішенням цього рівняння буде наступне вираження

$$T(r, \tau) = T_C + (T_0 - T_C) \left(\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2(-1)^{(n+1)} R \sin\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) e^{\left(\frac{\mu_n^2 a \tau}{R^2}\right)}}{r \mu_n} \right) \right). \quad (3.4)$$

Проводячи аналіз теплового впливу за допомогою даної формули на гранулу радіусом 1 мм, можна одержати зміну температури уздовж радіуса після закінчення 1 - ї, 3 - ї і 5 - ї секунд знаходження гранули в потоці теплоносія, рис. 3.

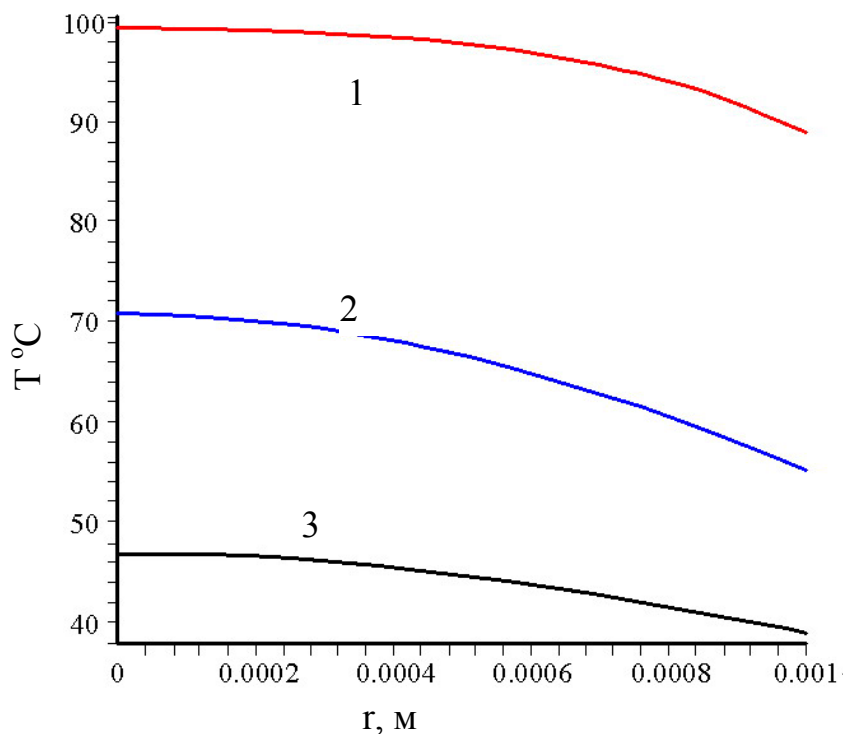


Рис. 3.5 – Зміна температури уздовж радіуса гранули діаметром 2 мм
1, 2, 3 - розподіл температур через відповідно 1 - ї, 3 - ї і 5-ї секунд знаходження гранули в потоці теплоносія.

Розрахунки наведені для умови: навколишня температура повітря 25 °С і початкова температура гранули 100 °С.

Аналогічно на рис 3.6. показані зміни температури уздовж радіуса гранули розміром 2 мм при її охолодженні від 100 °С до 25 °С.

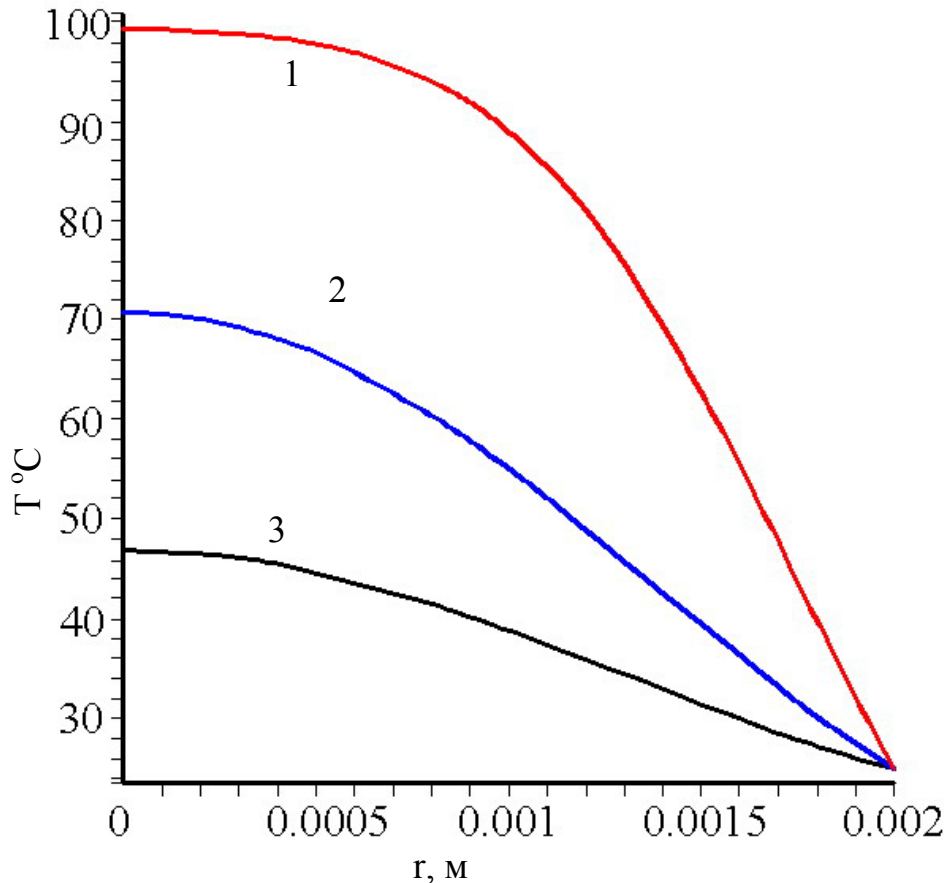


Рис. 3.6 – Зміна температури уздовж радіуса гранули діаметром 4 мм. Лінії 1, 2 і 3 відповідають відрізкам часу 1, 3 і 5 секунд знаходження гранули в потоці гарячого теплоносія.

Таким чином, аналіз чисельного рішення диференціальних рівнянь (3.2, 3.4) показує можливість застосування розрахунків, що наводяться вище, для визначення мінімального часу перебування гранули в потоці гарячого повітря, що важливо для формування пористої структури й часу наступного її охолодження для забезпечення міцнісних властивостей.

З іншого боку, отримані в результаті розрахунків величини часу перебування гранули в потоці гарячого повітря вимагають перевірки в

результаті наступних експериментальних досліджень, опис яких приводиться в наступних розділах.

3.3 Аналіз процесу сушіння гранули

У деяких випадках сушіння можливо описати кінетику внутрішнього й зовнішнього масообмінна частки рівнянням нестационарної дифузії з постійним коефіцієнтом m дифузії усередині гранули [73]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} U(r, \tau) = m \left(\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} U(r, \tau) \right) + \frac{2 \left(\frac{\partial}{\partial r} U(r, \tau) \right)}{r} \right). \quad (3.5)$$

$$\tau = 0, U(r, 0) = U_0.$$

Розв'язком цього диференціального рівняння, що описує розподіл локальних концентрацій вологи усередині гранули буде:

$$U(r, \tau) = U_p + (U_0 - U_p) \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\sin(\mu_n) - \mu_n \cos(\mu_n)) R \sin\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) e^{\left(\frac{\mu_n^2 m \tau}{R^2}\right)}}{(\mu_n - \sin(\mu_n) \cos(\mu_n)) r \mu_n} \right), \quad (3.6)$$

де U_0 - початковий вологовміст; U_p - рівноважне значення вологовмісту.

Аналізуючи отримане рішення можна одержати графічні залежності, які ілюструють розподіл вологовмісту уздовж радіуса гранули рівним 2 мм після закінчення 30, 100 і 200 секунд після початку сушіння в потоці повітря при температурі 100 °С та початковому вологовмісті 2% (величина температури

впливає через коефіцієнт дифузії, що від неї залежить і визначався по роботі [1]). Графіки наведені на рис. 3.7.

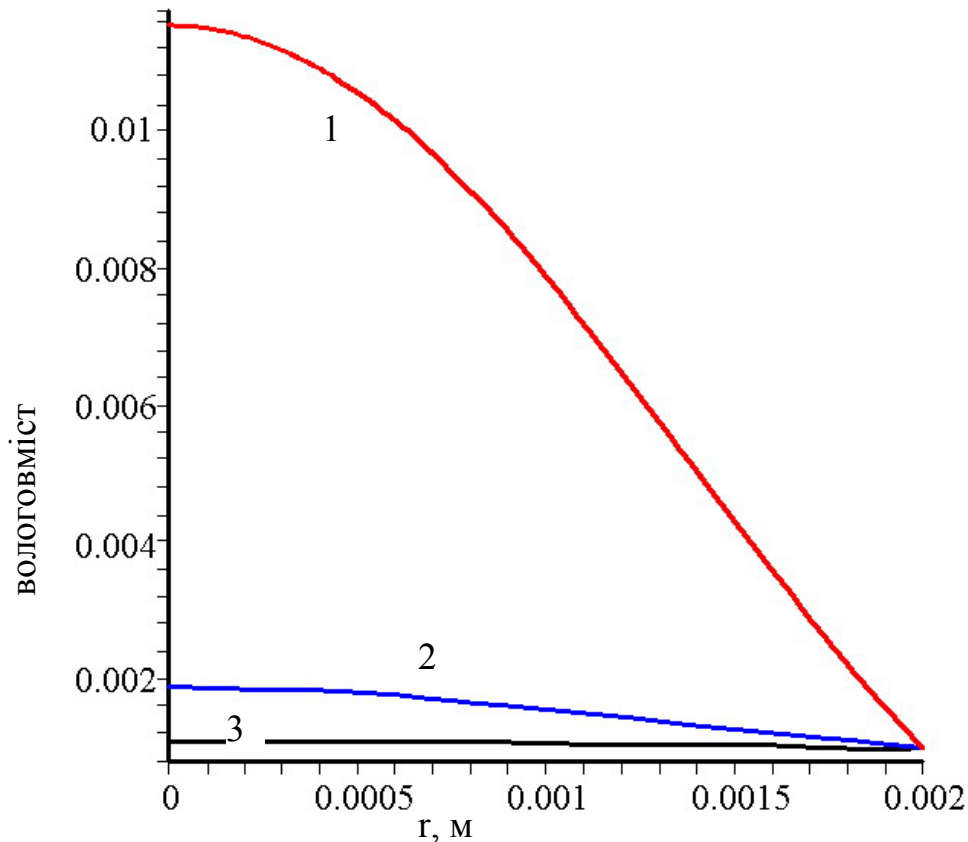


Рис. 3.7 – Розподіл вологовмісту уздовж радіуса гранули рівним 2 мм. Лінії 1, 2 і 3 відповідають відріzkам часу 30, 100 і 200 секунд відповідно.

3.4 Визначення кількості тепла необхідного для формування пористої структури гранули

Для виведення математичної залежності, за допомогою якої можна було б визначити кількість тепла що підводиться до гранули для видалення вологи у вигляді пари, що сприяло б утворенню пор, скористаємося наведеними в підрозділі 3.1 допущеннями й використовуємо основні геометричні позначення зазначені на рис. 3.1. При цьому враховуємо, що в промислових умовах процес повинен бути безперервним. Час перебування у зоні зволоження повинен бути мінімальним виходячи із зазначених вище умов забезпечення достатньої

міцності гранули й подальше її транспортування в робочу зону нагрівання й сушіння. Виходячи з цього, розподіл вологи уздовж радіусу гранули приймаємо таким, що змінюється за лінійним законом від максимальної величини в поверхневому шарі гранули до 0 в центрі.

Тоді величина елементарного об'єму усередині гранули, виражена у сферичній системі координат із центром співпадаючим із центром гранули, дорівнює (рис. 3.1.б)

$$d = dSdr, \quad (3.7)$$

де величина елементарної поверхні dS (рис. 3.1.б) у сферичній системі координат дорівнює

$$dS = r^2 \sin \theta d\theta d\varphi. \quad (3.8)$$

Тоді

$$dV = r^2 \sin \theta d\theta d\varphi dr, \quad (3.9)$$

і масу речовини, що перебуває в об'ємі dV можна визначити як

$$dm = \rho r^2 \sin \theta d\theta d\varphi dr, \quad (3.10)$$

а кількість тепла, який необхідно підвести до маси речовини dm дорівнює

$$\begin{aligned} dQ &= dQ_H + dQ_K = c(t_K - t_H)dm + rdm = \\ &= \rho [c(t_K - t_H) + ui] r^2 \sin \theta d\theta d\varphi dr, \end{aligned} \quad (3.11)$$

де i - питома теплота пароутворення.

Таким чином, інтегруючи рівняння (3.5), можна визначити загальну кількість тепла, яку необхідно передати гранулі

$$Q = 2\rho [c(t_K - t_H) + ui] \int_0^R \int_0^\pi \int_0^\pi r^2 \sin\theta d\theta d\varphi dr. \quad (3.12)$$

У загальному випадку теплоємність залежить від вологості матеріалу гранули. Тоді в рівнянні (2) необхідно враховувати зміну теплоємності й щільності уздовж радіуса $C = f(r)$ й $\rho = f(r)$.

Виходячи із припущення про лінійний закон зміни вологості гранули уздовж її радіуса можна записати

$$U = U_{\max} / R \times r, \quad (3.13)$$

$$\rho = \rho_{GP} - (\rho_{GP} - \rho_K)r/R, \quad (3.14)$$

де U і U_{\max} – поточна й максимальна вологість матеріалу гранули на її поверхні; $\rho_K - \rho_{GP}$ - відповідно щільність матеріалу насиченого вологою на поверхні й щільність матеріалу гранули; r – поточне значення радіуса гранули.

Або, з урахуванням, що

$$\rho_K = \frac{\rho_B \rho_{GP}}{\rho_B + (\rho_{GP} - \rho_B)U_{\max}}, \quad (3.15)$$

щільність матеріалу гранули буде змінюватися уздовж радіуса

$$\rho = \rho_{GP} - \left(\rho_{GP} - \frac{\rho_B \rho_{GP}}{\rho_B + (\rho_{GP} - \rho_B)U_{\max}} \right) r / R. \quad (3.16)$$

У свою чергу, теплоємність C є величиною, що також залежить від вологовмісту матеріалу

$$C = C_{ГР}(1-U) + C_B U = C_{ГР}\left(1 - \frac{rU_{\max}}{R}\right) + \frac{C_B rU_{\max}}{R}, \quad (3.17)$$

де $C_{ГР}$ - теплоємність матеріалу гранули, C_B - теплоємність води.

З огляду на малі розміри гранули, можна прийняти C_B уздовж радіуса як величину постійну при середній температурі між $t_H - t_K$.

Тоді формула (3.6) набуває вигляду

$$Q = 2 \int_0^R \int_0^\pi \int_0^\pi \left[\rho_{ГР} - \left(\rho_{ГР} - \frac{\rho_B \rho_{ГР}}{\rho_B + (\rho_{ГР} - \rho_B) U_{\max}} \right) r / R \right] \times \left[(C_{ГР}(1 - rU_{\max} / R) + C_B rU_{\max} / R)(t_K - t_H) + irU_{\max} / R \right] r^2 \sin \theta d\theta d\varphi dr. \quad (3.18)$$

Або, якщо позначити різницю між кінцевою й початковою температурою як:

$$\Delta t = t_K - t_H, \quad (3.19)$$

Тоді

$$Q = 2 \int_0^R \int_0^\pi \int_0^\pi \left[\rho_{ГР} - \left(\rho_{ГР} - \frac{\rho_B \rho_{ГР}}{\rho_B + (\rho_{ГР} - \rho_B) U_{\max}} \right) r / R \right] \times \left[\frac{C_{ГР} R - rU_{\max} C_{ГР} + C_B rU_{\max}}{R} \Delta t + irU_{\max} / R \right] r^2 \sin \theta d\theta d\varphi dr. \quad (3.20)$$

Переписавши останнє рівняння у вигляді, зручному для інтегрування й інтегруючи по φ , θ й r , одержуємо:

$$\begin{aligned}
& \int_0^\pi \int_0^\pi \int_0^R 2(\rho_{ГР} - (\rho_{ГР} - \rho_B \rho_{ГР} / (\rho_B + (\rho_{ГР} - \rho_B) U_{\max})) r / R) \times \\
& \times \left(\frac{(C_{ГР} R - r U_{\max} C_{ГР} + C_B r U_{\max})(t_K - t_H)}{R} + i r U_{\max} / R \right) r^2 \sin(q) dr d\varphi d\theta = \\
& = \frac{1}{15(\rho_B + U_{\max} \rho_{ГР} - U_{\max} \rho_B)} (\rho_{ГР} R^3 (3U_{\max}^2 \rho_{ГР} C_{ГР} (t_K - t_H) - \\
& - 3U_{\max}^2 \rho_{ГР} (t_K - t_H) C_B - 3U_{\max}^2 \rho_{ГР} i - 3U_{\max}^2 C_{ГР} (t_K - t_H) \rho_B + \\
& + 3U_{\max}^2 (t_K - t_H) C_B \rho_B + 3U_{\max}^2 i \rho_B - 15(t_K - t_H) C_B U_{\max} \rho_B - \\
& - 15i U_{\max} \rho_B - 5C_{ГР} (t_K - t_H) U_{\max} \rho_{ГР} - 20C_{ГР} (t_K - t_H) \rho_B + \\
& + 20C_{ГР} (t_K - t_H) U_{\max} \rho_B) \pi), \tag{3.21}
\end{aligned}$$

де (ρ_B) й $(\rho_{ГР})$ - відповідно щільність води й щільність матеріалу гранули; $(C_{ГР})$ і (C_B) - відповідно теплоємність матеріалу гранули й води при середній температурі; (U_{\max}) - максимальний вологовміст на поверхні гранули; $(t_K - t_H)$ - різниця температур між кипінням і початком нагрівання гранули; i – питома теплота пароутворення; R – радіус краплі.

Таким чином, після інтегрування одержуємо наступний вираз для визначення кількості тепла $Q_{ГР}$, що підводиться до однієї гранули

$$\begin{aligned}
Q_{ГР} = & \frac{1}{15(\rho_B + U_{\max} \rho_{ГР} - U_{\max} \rho_B)} (\rho_{ГР} R^3 (3U_{\max}^2 \rho_{ГР} C_{ГР} (t_K - t_H) - \\
& - 3U_{\max}^2 \rho_{ГР} (t_K - t_H) C_B - 3U_{\max}^2 \rho_{ГР} i - 3U_{\max}^2 C_{ГР} (t_K - t_H) \rho_B + \\
& + 3U_{\max}^2 (t_K - t_H) C_B \rho_B + 3U_{\max}^2 i \rho_B - 15(t_K - t_H) C_B U_{\max} \rho_B - 15i U_{\max} \rho_B - \\
& - 5C_{ГР} (t_K - t_H) U_{\max} \rho_{ГР} - 20C_{ГР} (t_K - t_H) \rho_B + \\
& + 20C_{ГР} (t_K - t_H) U_{\max} \rho_B) \pi). \tag{3.22}
\end{aligned}$$

Отримане рівняння (3.22) дозволяє визначити кількість тепла, необхідну для видалення вологи із гранули з одночасним її випаровуванням, що сприяє утворенню в гранулі пористої структури.

Припускаючи, що для всієї маси гранул M , що перебувають у робочій області вихрової конусоподібної камери, характерний діаметр $d_k = 2R$, можна визначити кількість гранул, які одночасно перебувають у робочій зоні гранулятора

$$N = \frac{3M}{4\pi\rho_k R^3}. \quad (3.23)$$

Тоді загальна кількість тепла, що підводиться до всієї маси гранул, що перебувають у робочій області вихрової камери дорівнює

$$Q_0 = N \cdot Q_{ГР}. \quad (3.24)$$

Звичайно основним завданням виробництва пористих гранул є забезпечення заданої величини порозності “ ε ”.

$$\varepsilon = (V_{ГР} - V_M) / V_{ГР}, \quad (3.25)$$

де $V_{ГР}$ й V_M – відповідно об'єми гранули й матеріалу, з якого складається гранула.

Якщо виходити із припущення, що об'єм пор утворених вихідними із краплі парами вологи, порівняємо з величиною об'єму, що займає волога в краплі при величині вологовмісту рівної “ U ”, то об'єм матеріалу гранули дорівнює

$$V_M = V_{ГР}(1 - U_0), \quad (3.26)$$

де U_0 - об'ємна частка вологовмісту в гранулі.

Тоді $\varepsilon \approx U_0$.

Задаючи значення U_0 , за яким можна визначити вологовміст i , відповідно, із припущення про лінійний закон насичення вологою гранули уздовж радіуса $U_{\max} = 2U_0$, можна використовувати вираз (3.22) для визначення Q_{GR} .

Математичні вирази, що наводяться в даному розділі, установлюють залежність кількості тепла, що підводиться, від розмірів гранули, щільності її матеріалу і його вологості. Тим самим за допомогою даних розрахунків можна визначити кількість тепла, яке необхідно витратити для створення необхідної пористої структури гранули. Змінюючи вологовміст матеріалу гранули можна змінювати її порозність. Але для перевірки раніше висловленого припущення про взаємозв'язок вологості матеріалу гранули і її порозності після видалення вологи й установлення взаємозв'язку між вологістю матеріалу гранули й одержанням скінченної величини пористості необхідне проведення додаткових експериментальних досліджень, результати яких викладені в наступних розділах.

3.5 Силний вплив на гранулу в потоці газу зі швидкістю, що змінюється

У результаті того, що для обробки гранул з метою одержання в них пористої структури, потрібно забезпечити заданий час перебування гранули в робочій області, а гранула, внаслідок сушіння, змінює свою масу, і в деяких випадках і об'єм [1]. Істотний інтерес для таких розрахунків представляє аналіз силового впливу на гранулу газового потоку.

У загальному випадку, сила, що діє на гранулу з боку газового потоку уздовж вертикальної осі апарата дорівнює

$$F = \int_s dF, \quad (3.27)$$

де S - площа поперечного перерізу краплі.

Величина dF дорівнює

$$dF = \psi \frac{\rho_z V_z^2}{2} dS, \quad (3.28)$$

де ψ - коефіцієнт опору; dS - елементарна площа, до осьового напрямку руху потоку.

Беручи до уваги припущення, що гранула являє собою кулясте тіло з радіусом R , для випадку, коли $V_z = f(r) = \text{const}$,

$$F = \int_{S'} dF = \psi \frac{\rho_z V_z^2}{2} \pi R^2. \quad (3.29)$$

З огляду на значні радіальні розміри робочої області гранулятора

$$V_z = \frac{Q}{\pi R_K^2}, \quad (3.30)$$

де Q – об'ємна витрата газу; R_K – радіус перетину робочої області гранулятора з координатою Z .

Якщо врахувати, що робоча область гранулятора являє собою патрубок зі змінним перерізом (для спрощення приймаємо конічну область), то (рис 3.8) зміна осьової складової газового потоку при малому куті відкриття конуса підкоряється наступному виразу (3.31).

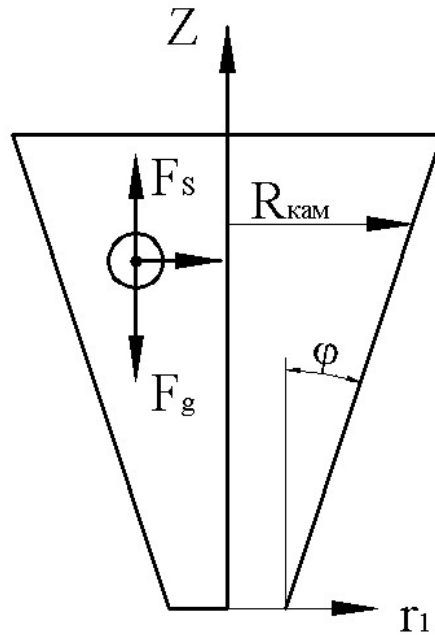


Рис 3.8 – Схема конічної робочої області гранулятора: φ - половина кута розкриття дифузора; r_1 – поточне значення радіуса; Z – вертикальна вісь координат співпадаюча з віссю робочої області гранулятора; F_s і F_g - відповідно сила опору й сила ваги, що діє на гранулу радіусом R ; $R_{кам}$ – радіус камери.

Оскільки $R_{кам}$ у довільному перетині з координатою “ Z ” дорівнює $R_{кам} = tg(\varphi)Z$, то значення $V_z(Z)$ дорівнює

$$V_z(Z) = \frac{Q}{\pi(tg\varphi)^2 Z^2}. \quad (3.31)$$

Тоді сила опору уздовж осі гранулятора дорівнює

$$F_s = \psi \frac{\rho_s \pi R^2}{2} \left(\frac{Q}{\pi(tg\varphi) Z} \right)^2 = \frac{\psi}{2\pi} \rho_s \frac{Q^2}{(tg\varphi)^2 Z^2}, \quad (3.32)$$

де R - радіус гранули.

Сила ваги, що діє на гранулу

$$F_g = \rho_T g V_{zp} = \frac{4}{3} \pi R^3 \cdot \rho_T g. \quad (3.33)$$

Умовою рівноваги гранули в газовому потоці є $F_s = F_g$.

При збільшенні F_s гранула буде рухатися нагору, а при зменшенні – вниз апарата.

З умови рівноваги можна визначити швидкість газу, що відповідає цьому стану $V_{p.zp}$ і за її значенням з'ясувати, у якому місці по висоті робочої області гранулятора буде перебувати гранула

$$V_{p.zp} = 1,633 \sqrt{\frac{\rho_T g R}{\psi \rho_z}}. \quad (3.34)$$

Якщо гранула насичена вологою й матеріал має вологість U ($\frac{\text{кг.вологи}}{\text{кг.а.с.р-ни}}$), то маса гранули дорівнює

$$m_{zp} = m_{a.c.p-ни} + m_p, \quad (3.35)$$

де $m_{a.c.p-ни}$ й m_p - маса абсолютно сухої речовини гранули й маса рідини, якою насичена гранула.

Припускаючи, що до насичення вологою, стан гранули був близько до абсолютно сухої речовини, її радіус був рівний R_1 , і в процесі насичення вологою об'єм гранули практично не змінився, маса зволоженої гранули дорівнює

$$m_{zp} = \frac{4}{3} \pi R_1^3 \rho_z (1 + U). \quad (3.36)$$

Відповідно до цього вираз умови рівноваги (3.33) запишеться в наступному вигляді

$$\frac{4}{3} \pi \rho_T g R_1^3 (1 + U) = \psi \frac{\pi \rho_z R_1^2}{2} V_{p.zp}^2, \quad (3.37)$$

Звідки

$$V_{p.zp} = 1,633 \sqrt{\frac{\rho_T g R_1 (1 + U)}{\psi \rho_z}}. \quad (3.38)$$

Розглянемо, як впливає на величину $V_{p.zp}$ зміна вологості матеріалу U у процесі сушіння, і як наслідок – на масу гранули. Крім цього, у результаті сушіння, діаметр гранули збільшується через модифікаційні переходи [1] і утворення пористої структури.

Виходячи зі схеми, прийнятої на рис 3.1 і величини dm сухої речовини, вага елементарного об'єму dV гранули з урахуванням наявності води дорівнює

$$dm = \rho_T (1 + U(r, \tau)) r^2 \sin \theta d\theta d\varphi dr, \quad (3.39)$$

де $dV = r^2 \sin \theta d\theta d\varphi dr$ - величина елементарного об'єму [75].

З іншого боку, маса «сухої» гранули радіусом « R » у загальному випадку дорівнює

$$Ms_r = 2 \int_0^R \int_0^\pi \int_0^\pi \rho_s r^2 \sin(\Theta) d\Theta d\varphi dr, \quad (3.40)$$

або після інтегрування

$$Ms = \frac{4}{3} \rho_s \pi R^3. \quad (3.41)$$

Або з урахуванням, що U є функцією від r і часу сушіння τ

$$Mg_{n=\infty}(\tau) = \frac{4}{3} \rho_r \times \left(1 + \frac{\int_0^R U_p + (U_0 - U_p) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2(\sin(n\pi) - n\pi \cos(n\pi)) R \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{-n\pi m \tau}{R}\right)}}{(n\pi - \sin(n\pi) \cos(n\pi)) n\pi} \right) dr}{R} \right) \pi R^3 \quad (3.42)$$

де m - коефіцієнт дифузії.

Крім цього, у вищенаведеному рівнянні враховувалося, що в кожний момент часу вологовміст у гранулі приймає деяке середнє значення, що обчислюється виходячи із властивостей інтеграла [74].

Проведені розрахунки показують, що в розв'язанні диференціального рівняння, що описує процес масопередачі в процесі сушіння, визначним є сума перших двох складових. Подальше обчислення суми призводить до зміни отриманого результату в сьомому знаку дробової частини. Тому обмежимося

обчисленням двох перших коефіцієнтів суми. Звідки рівняння для визначення зміни вологості в часі набуває вигляду

$$U_s(\tau) = \frac{\int_0^R U_p + (U_0 - U_p) \left(\frac{2R \sin\left(\frac{\pi r}{R}\right) e^{\left(-\frac{\pi^2 m \tau}{R^2}\right)} - \frac{R \sin\left(\frac{2\pi r}{R}\right) e^{\left(-\frac{4\pi^2 m \tau}{R^2}\right)}}{\pi r} \right) dr}{R}. \quad (3.43)$$

Інтегруючи отриманий вираз, ми можемо одержати залежність для визначення маси гранули в будь-який момент часу в процесі сушіння

$$Mg(\tau) = \frac{4}{3} \rho_s \pi R^3 \times \left(1 + \frac{\int_0^R U_p + (U_0 - U_p) \left(\frac{2R \sin\left(\frac{\pi r}{R}\right) e^{\left(-\frac{\pi^2 m \tau}{R^2}\right)} - \frac{R \sin\left(\frac{2\pi r}{R}\right) e^{\left(-\frac{4\pi^2 m \tau}{R^2}\right)}}{\pi r} \right) dr}{R} \right) + 2R \left(\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) (-\sin(n\pi) + n\pi \cos(n\pi)) e^{\left(-\frac{n^2 \pi^2 m \tau}{R^2}\right)}}{(n\pi - \sin(n\pi) \cos(n\pi))n} \right) \right) U_p dr. \quad (3.44)$$

Як показувалося раніше, відповідно до стандарту на аміачну селітру [ДСТУ 2 – 85], основна маса гранул (до 98 %) повинна бути діаметром близько

2 мм. Виходячи із цього, основною сировиною для виробництва ПАС із уже сформованих твердих гранул шляхом їхнього зволоження й наступної термодинамічної обробки є сировина розміром гранул $d_{gp} = 2$ мм (радіус $R = 1$ мм). Проводячи розрахунки отриманого виразу в межах від 0 до 150 секунд, одержимо наступну графічну залежність.

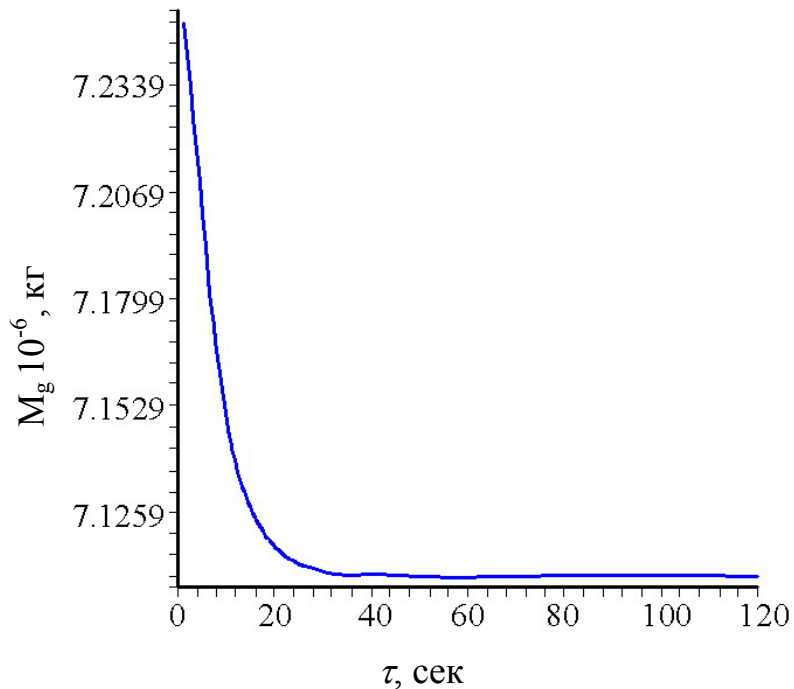


Рис. 3.9 – Залежність зміни маси гранули ($d = 2$ мм) у часі в процесі сушіння.

На рис. 3.9. показана залежність зміни маси гранули в часі в процесі сушіння. Виходячи з того, що розрахунковий час сушіння гранули, яка має вологість 2%, становить 150 секунд, що ілюструє розрахунки за формулою (3.44), то на рис. 3.9. наведені результати розрахунків в інтервалі часу від 0 до 150 секунд для гранули діаметром 2 мм.

Одержані результати підтверджуються експериментальними дослідженнями інших авторів, де відзначається існування декількох зон сушіння, перша з яких відповідає найбільш інтенсивному процесу [91].

Таким чином, сила ваги, що діє на гранулу в робочій області буде змінюватися в часі, що призводить до зміни виразу (3.33). І, як наслідок, буде відбуватися зміна швидкості $V_{p.зр.}$ у часі. Тоді рівняння (3.37) набуває вигляду

$$F_g = \frac{4}{3} g \rho_p \pi R^3 \times \left(1 + \frac{\int_0^R U_p + (U_0 - U_p) \left(\frac{2R \sin\left(\frac{\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{\pi^2 m \tau}{R^2}\right)} - R \sin\left(\frac{2\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{4\pi^2 m \tau}{R^2}\right)} \right)}{\pi r} dr}{R} \right) = \quad (3.45)$$

$$= \frac{1}{2} \psi \rho_{gas} W_{(\rho, gr, nov)}^2 \pi R_{nov}^2.$$

Звідки вираз для визначення $V_{p.зр.}(\tau)$ має вигляд:

$$V_{p.зр.} = -\frac{1}{3\psi \rho_{gaz} \pi R_{nov}} \left(2\sqrt{6} \text{sqrt}(\psi \rho_{gaz} \pi \rho_p g (\pi R + U_p \int_0^R 1 dr \pi + 2U_0 \int_0^R \frac{R \sin\left(\frac{\pi r}{R}\right)}{r e^{\left(\frac{\pi^2 m \tau}{R^2}\right)}} dr - \right. \quad (3.46)$$

$$\left. - 2U_0 \int_0^R \frac{R \sin\left(\frac{\pi r}{R}\right) \cos\left(\frac{\pi r}{R}\right)}{r \left(e^{\left(\frac{\pi^2 m \tau}{R^2}\right)} \right)^4} dr - 2U_p \int_0^R \frac{R \sin\left(\frac{\pi r}{R}\right)}{r e^{\left(\frac{\pi^2 m \tau}{R^2}\right)}} dr + 2U_p \int_0^R \frac{R \sin\left(\frac{\pi r}{R}\right) \cos\left(\frac{\pi r}{R}\right)}{r \left(e^{\left(\frac{\pi^2 m \tau}{R^2}\right)} \right)^4} dr \right) R,$$

На рис 3.10. показана графічна залежність $V_{p.зр.}(\tau)$ для гранули діаметром 2 мм при початковій вологості матеріалу гранули 2 %.

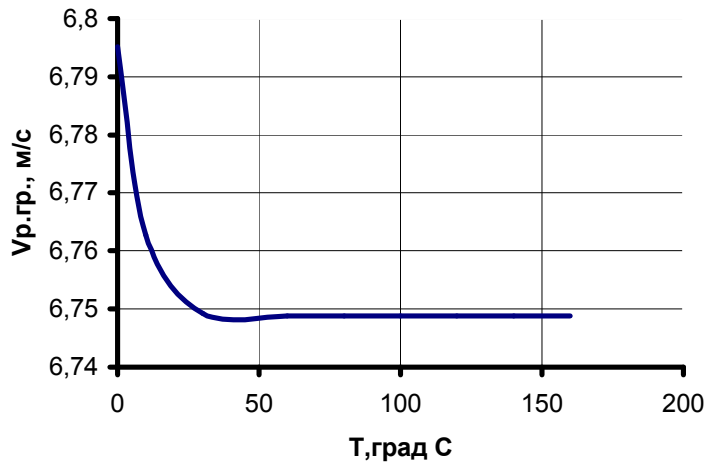


Рис. 3.10 – Зміна швидкості, що відповідає рівноважному стану гранули від часу сушіння.

Якщо розглядати, як змінилася величина швидкості віднесення, то, провівши розрахунок для гранул $d = 2$ мм, одержуємо, що швидкість змінюється в межах від 8,84 м/с до 8,93 м/с.

З іншого боку, нагрівши до 100 °С гранули аміачної селітри й утворення пор приводить до збільшення її об'єму. За даними досліджень [1] це збільшення становить для радіуса 1 мм величину $\approx 0,3$ мм. З урахуванням збільшення радіуса гранули швидкість складе $V_{p.gr.1}$, що впливає з умови збереження маси сухої гранули.

$$\frac{4\pi R^3}{3} \rho_T g = \psi \frac{\rho_z V_{p.sp.1}^2}{2} \pi R_n^2,$$

звідки випливає, що

$$V_{p.sp.1} = \frac{2\sqrt{6}\sqrt{\psi\rho_T\rho_TgRR}}{3\psi\rho_zR_n}. \quad (3.47)$$

На рис 3.11. показана зміна швидкості газу по висоті конічної робочої області формула ($V_z = \frac{Q}{\pi R_k^2}$, $R_k = \operatorname{tg} \varphi \times Z$), де кут відкриття конуса становить 26° , а величина $\varphi = 13^\circ$ рис 3.8.

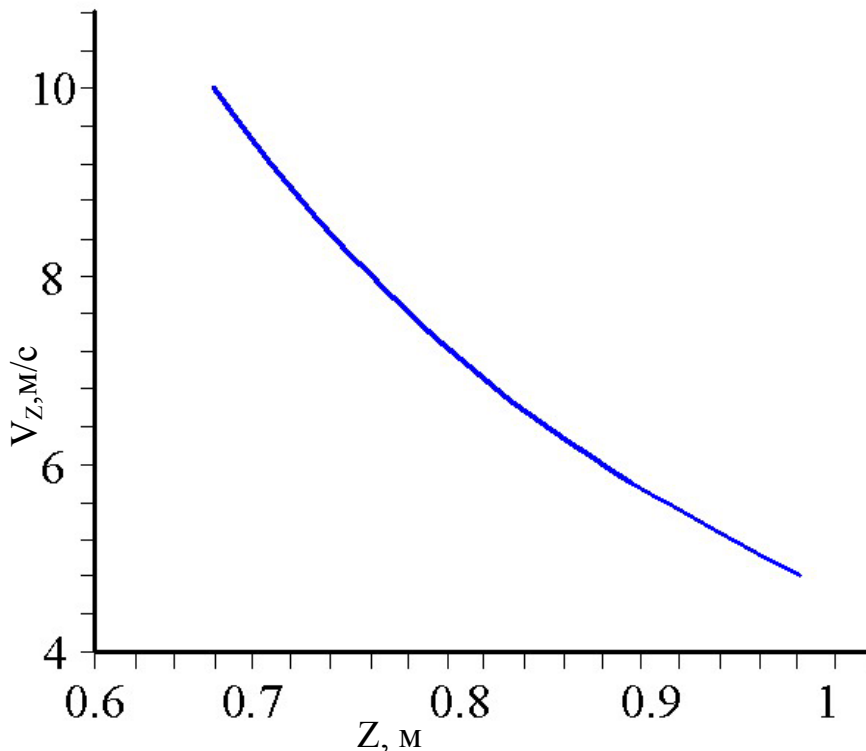


Рис 3.11 – Зміна швидкості газу по висоті конічної робочої області апарата

При швидкості відповідній умовам рівноваги для вихідної гранули буде перебувати на $Z = 0,52$ м, а потім у результаті сушіння переміститися на $Z = 0,63$ м, тобто на 100 мм піде вище. Якщо зменшити величину α , то різниця між положеннями гранули до й після сушіння ще зросте, що можна побачити на графіку рис (3.11), де показана різниця $\Delta Z = f(\alpha)$. Розрахунки проведені для $d_{sp} = 2$ мм, кут α змінювався в межах від 13° до 6° .

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМО- Й ГІДРОДИНАМІЧНИХ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА УТВОРЕННЯ ПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ В ГРАНУЛІ

4.1 Задачі експериментальних досліджень

Завданням експериментальних досліджень є підтвердження працездатності фізичної моделі процесу утворення пор у гранулах і вірогідності математичного опису даного процесу. У тому числі встановлення впливу на пористість, міцність, масловбираючу й маслоутримуючу здатність одержуваної гранули таких факторів як температура навколишнього середовища, температура в робочій зоні апарата, час перебування матеріалу в робочій зоні апарата, початковий вологовміст матеріалу, об'єм сушильного агента, який проходить через матеріал і визначення необхідного часу перебування гранули в апараті.

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторії науково-дослідної організації ТОВ Науково-виробнича фірма «Хімтехсервіс» на двох спеціально виготовлених апаратах-сушарках, один із яких дозволяє провести дослідження в статичних умовах, а інша в динамічних.

Основною метою проведення експериментальних досліджень з визначення часу перебування у вологому середовищі було отримання необхідної інформації для розробки необхідних рекомендацій по створенню умов для досягнення гранулами аміачної селітри необхідної вологості. Така інформація необхідна також для перевірки розрахункових методів зволоження гранул.

Окрім цього, перед проведенням експериментальних досліджень по сушінню гранул у статичних і динамічних умовах, гранули необхідно зволожити до заданого значення, що робить експериментальні дослідження, пов'язані з наступним сушінням, більш точними. Метою експерименту також є

одержання математичної залежності часу перебування гранул у вологому потоці повітря від таких параметрів як об'ємна витрата вологого повітря та швидкості обтікання повітрям гранули, що визначає гідродинамічні умови процесу зволоження і його температури.

4.2 Методика проведення досліджень по визначенню часу перебування гранул у вологому середовищі

Експеримент проводився таким чином. У барботер містилася певна кількість попередньо висушених та зважених гранул аміачної селітри й піддавалося зволоженню при різних витратах повітря. Вологість повітря в робочій зоні становила 100%. Через якийсь час зволоження припинялося й визначався вологовміст гранул. Вологовміст визначався наступним чином, гранули знов зважувались і за кількістю набраної маси визначався вологовміст. Так були отримані дані про те, скільки часу необхідно воложити гранули, щоб вони досягли вологовмісти 1, 2 і 3 % (мас) при різних витратах повітря й різних температурах повітря.

Після проведення серії експериментів були отримані значення часу зволоження. У таблиці 4.1 надані дані по зволоженню в умовах витрати повітря $0,008 \text{ м}^3/\text{с}$, що відповідає швидкості обтікання гранул $1,02 \text{ м/с}$ та числу Рейнольдса $135,8 \leq Re \leq 143,3$.

На рис.4.1 показані графічні залежності часу зволоження від кінцевого вологовмісту для гранул аміачної селітри при температурі в робочій зоні $20 \text{ }^\circ\text{C}$ і при витратах повітря $0,015$ і $0,02 \text{ м}^3/\text{с}$, що відповідає швидкості обтікання гранул $1,9 \text{ м/с}$ і $2,55 \text{ м/с}$ та числу Рейнольдса $Re = 272,3$ і $365,5$.

Таблиця 4.1 – Зволоження в умовах витрати повітря 0,008 м³/с

Q, м ³ /с	t, °C	x, %	τ, с	d _{гр} , м	Re
0,008	20	1	347	0,002	143,3
0,008	25	1	334	0,002	139,5
0,008	30	1	323	0,002	135,8
0,008	20	2	479	0,002	143,3
0,008	25	2	470	0,002	139,5
0,008	30	2	457	0,002	135,8
0,008	20	3	686	0,002	143,3
0,008	25	3	677	0,002	139,5
0,008	30	3	669	0,002	135,8

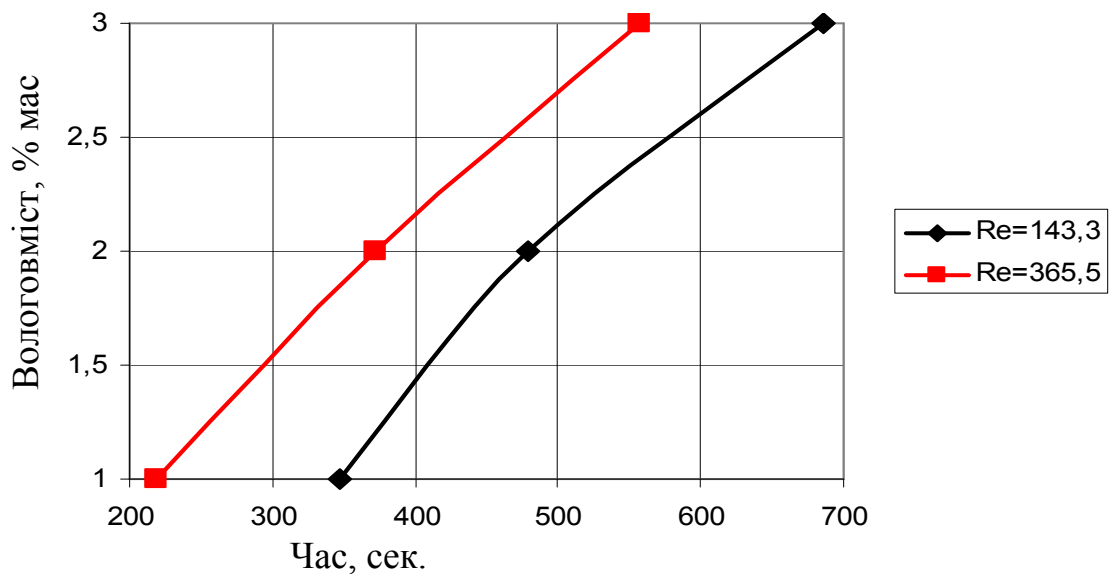


Рис. 4.1 – Залежність вологовмісту від часу зволоження при температурі 20 °C.

У таблиці 2 подані дані із зволоження в умовах витрати повітря 0,02 м³/с, що відповідає швидкості обтікання гранул 2,55 м/с та числу Рейнольдса $346,2 \leq Re \leq 365,5$.

Таблиця 4.2 – Зволоження в умовах витрати повітря 0,02 м³/с

Q, м ³ /с	t, °C	x, %	τ, с	d _{гр} , м	Re
0,02	20	1	219	0,002	365,5
0,02	25	1	213	0,002	355,6
0,02	30	1	208	0,002	346,2
0,02	20	2	372	0,002	365,5
0,02	25	2	359	0,002	355,6
0,02	30	2	347	0,002	346,2
0,02	20	3	557	0,002	365,5
0,02	25	3	542	0,002	355,6
0,02	30	3	530	0,002	346,2

На рис. 4.2 показані графічні залежності часу зволоження від кінцевого вологовмісту для гранул аміачної селітри при температурі в робочій зоні 25 °C і при витратах повітря 0,015 і 0,02 м³/с, що відповідає швидкості обтікання гранул 1,9 м/с і 2,55 м/с та числу Рейнольдса Re = 264,9 і 355,6.

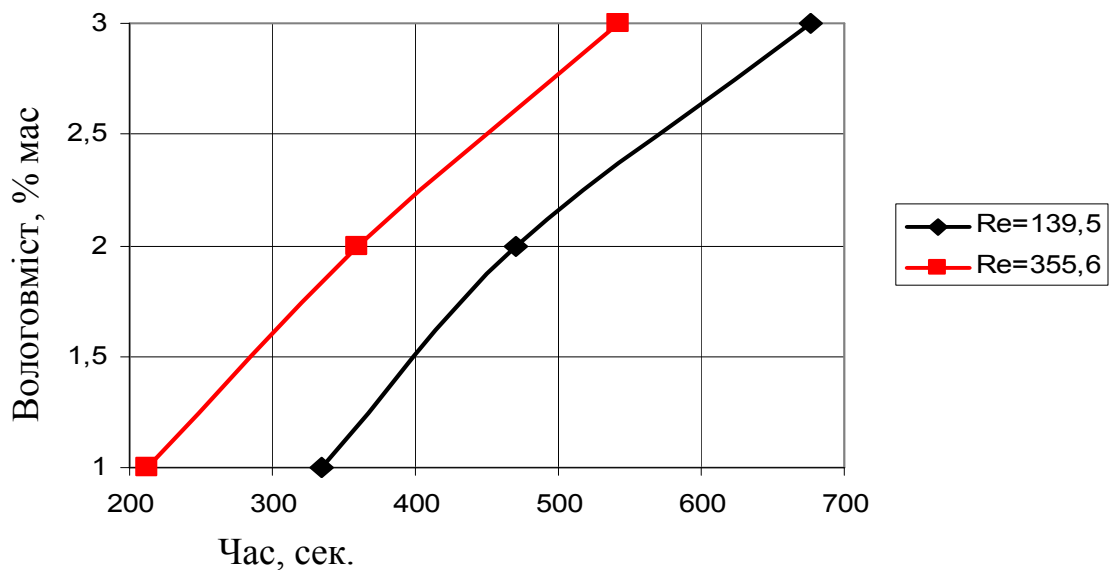


Рис. 4.2 – Залежність вологовмісту від часу зволоження при температурі 25 °C.

На рис. 4.3 показані графічні залежності часу зволоження від кінцевого вологовмісту для гранул аміачної селітри при температурі в робочій зоні 30 °С і при витратах повітря 0,015 і 0,02 м³/с, що відповідає швидкості обтікання гранул 1,9 м/с і 2,55 м/с та числу Рейнольдса $Re = 258,0$ і $346,2$.

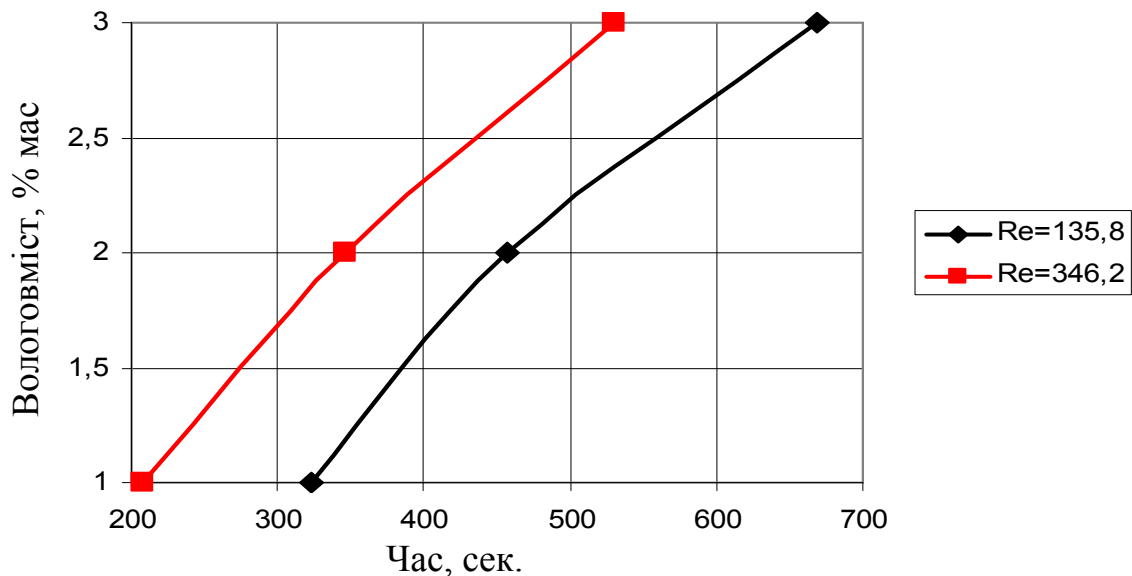


Рис. 4.3 – Залежність вологовмісту від часу зволоження при температурі 30 °С.

Проаналізувавши графіки, наведені на рис. 4.1 – 4.3 можна сказати, що вплив температури у зоні зволоження на процес не значний і час зволоження з підвищенням температури, у середньому, зменшується на 20 - 30 секунд. Розглянувши ж вплив кінцевого вологовмісту на тривалість зволоження, можна затверджувати, що залежність практично лінійна й вплив кількості вологого повітря минаючого через шар матеріалу не значне.

На рис. 4.4 показано залежності часу зволоження від температури в робочій зоні при витратах повітря 0,015 і 0,02 м³/с для гранул з кінцевим вологовмістом 1 % мас.

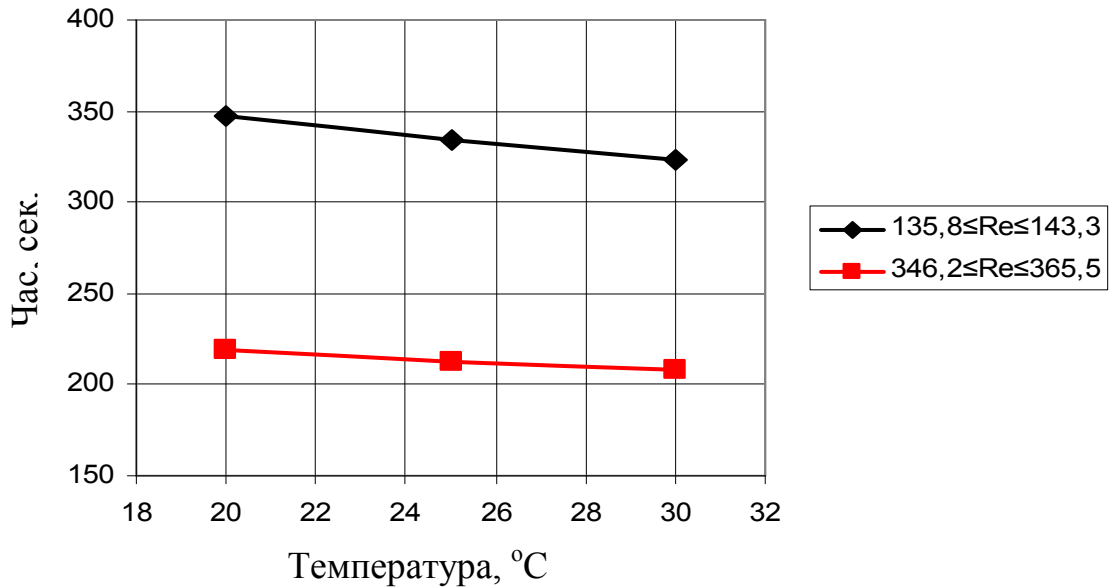


Рис. 4.4 – Залежність часу зволоження від температури при кінцевому вологовмісту гранул 1 %.

На рис. 4.5 показано залежності часу зволоження від температури в робочій зоні при витратах повітря 0,015 і 0,02 м³/с, що відповідає швидкості обтікання гранул 1,9 м/с і 2,55 м/с, для гранул з кінцевим вологовмістом 2 % мас.

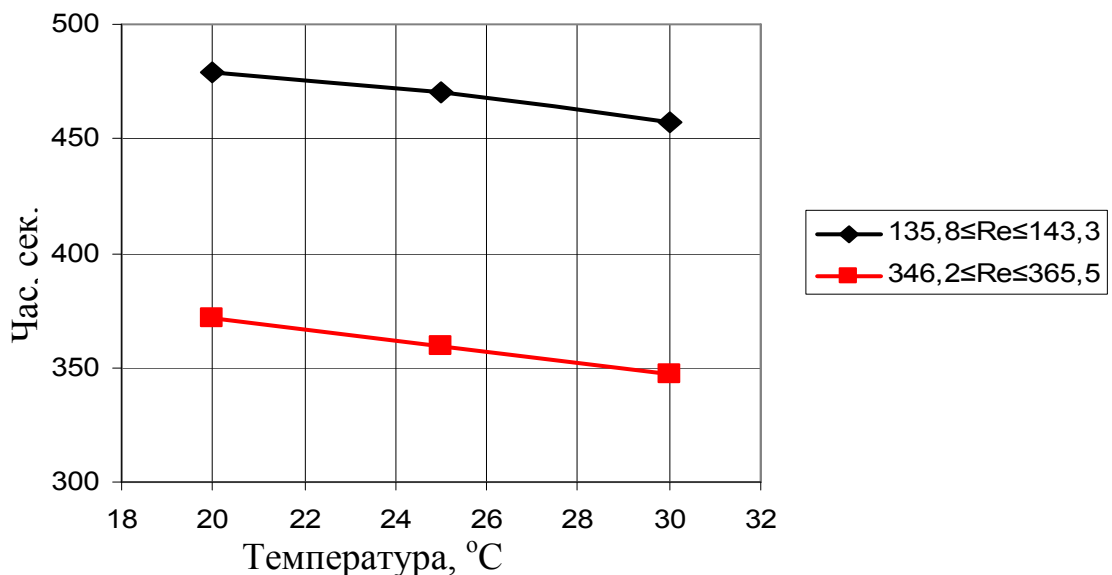


Рис. 4.5 – Залежність часу зволоження від температури при кінцевому вологовмісті гранул 2 %.

На рис. 4.6 показано залежності часу зволоження від температури в робочій зоні при витратах повітря 0,015 і 0,02 м³/с, що відповідає швидкості обтікання гранул 1,9 м/с і 2,55 м/с, для гранул з кінцевим вологовмістом 3 % мас.

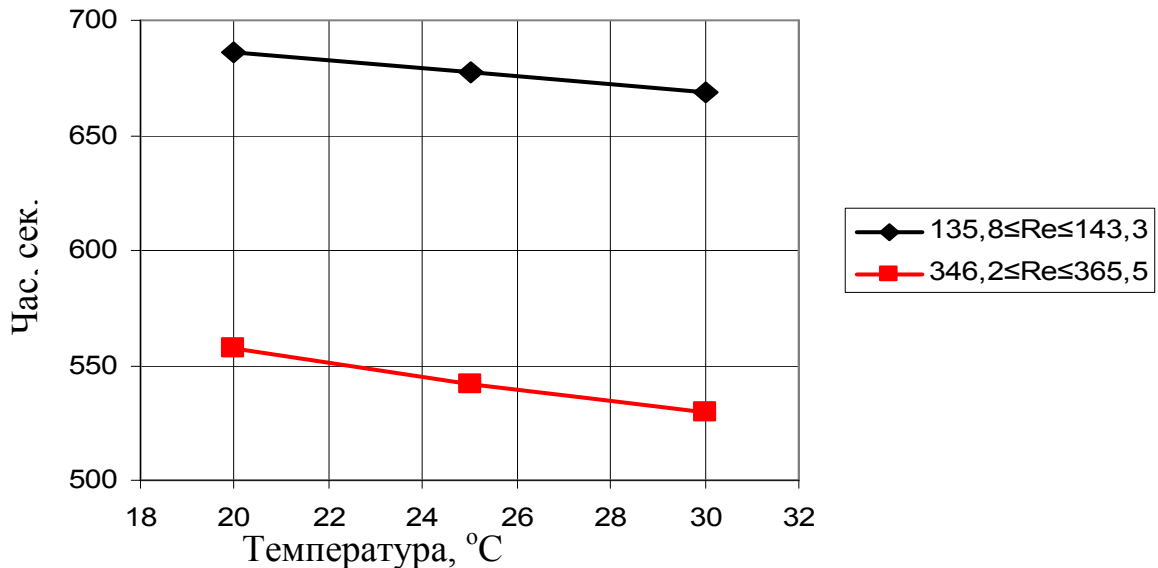


Рис. 4.6 – Залежність часу зволоження від температури при кінцевому вологовмісті гранул 3 %.

Із графічних залежностей, поданих на рис.4.4 – 4.6 видно, що зміна кількості вологого повітря в робочій зоні апарата в більшу сторону скорочує час зволоження для гранул з кінцевим вологовмістом 1 % - у середньому на 15 – 28 секунд, для гранул з кінцевим вологовмістом 2 % - у середньому на 7 – 10 секунд, для гранул з кінцевим вологовмістом 3 % - у середньому на 29 – 39 секунд.

Отримані графіки з достатньою для інженерного розрахунку точністю, для визначення $\tau=f(U, Re)$, інтерполюються залежностями, які наведені нижче.

$$\tau = (-0,0966 Re + 51,318)U^2 + (-0,3843 Re - 35,451)U + (-0,8629 Re + 413,4). \quad (4.1)$$

Ця залежність справедлива, коли число Рейнольдса знаходиться у межах 143 – 365,5 та температура дорівнює $T = 20$ °С.

Для випадку, коли Рейнольдс знаходиться у межах 139,5 – 355,6 та температура дорівнює $T = 25$ °С, залежність $\tau=f(U, Re)$ буде виглядати наступним чином:

$$\tau = (-0,0787Re + 46,474)U^2 + (-0,2823Re - 9,8776)U + (-0,7635Re + 375,51). \quad (4.2)$$

Також отримана залежність $\tau=f(U, Re)$ для випадку, коли число Рейнольдса знаходиться у межах 135,8 – 346,2 та температура дорівнює $T = 30$ °С, вона виглядає таким чином:

$$\tau = (-0,0808Re + 49,972)U^2 + (-0,2662Re - 19,144)U + (-0,7319Re + 366,4). \quad (4.3)$$

Одержати більш широкий діапазон чисел Re неможливо, тому що при його збільшенні буде відбуватися віднесення гранул, а при зменшенні не буде утворюватися киплячий шар. Це твердження доводить наступний розрахунок

$$Ar = \frac{d^3 \rho_s \rho_m g}{\mu^2} \quad (4.4)$$

$$Ar = \frac{0,002^3 \cdot 1700 \cdot 1,29 \cdot 9,81}{(0,018 \cdot 10^{-3})^2} = 5,31 \cdot 10^5.$$

Значенню $Ar=5,31 \cdot 10^5$ відповідає критерій Лященко $Lu_{кр} = 30$.

$$\omega_{кр} = \sqrt[3]{\frac{Ly_{кр} \mu \rho_m g}{\rho_6^2}}$$

$$\omega_{кр} = \sqrt[3]{\frac{30 \cdot 0,018 \cdot 10^{-3} \cdot 1700 \cdot 9,81}{1,29^2}} = 1,75 \text{ м/с.}$$

Робоча швидкість $\omega = K_{\omega} \omega_{кр}$

K_{ω} - число псевдозрідження приймається рівним 1,6 [7]

$$\omega = 2,8 \text{ м/с}$$

Критична швидкість і швидкість робоча відповідають діапазону швидкостей застосованих в експерименті, підвищувати й знижувати швидкість не рекомендується внаслідок причин описаних вище.

4.3 Методика проведення досліджень в статичних умовах

Внаслідок того, що аміачна селітра дуже гігроскопічна та спочатку має якусь кількість вологи, що залежить від вологості навколишнього середовища, гранули аміачної селітри піддавалися сушінню доти, поки не припинялося зниження їх маси. Потім гранули поміщалися в герметичну ємність, у якій вони охолоджувалися. Далі наважка гранульованої аміачної селітри зволожувалася до заданої концентрації й розміщувалася в установку на ваги, де піддавалася сушінню. Сушіння тривало доти, поки із гранул не вийде вся введена в них волога.

Дослідження проводилися при температурах в апараті 125 – 135 °С і початковому вологовмісті гранул, що задається з точністю 0,5 % мас. у діапазоні 1 – 3 % мас. У процесі сушіння фіксувалися показання часу від

початку експерименту з точністю до 1 сек. доти поки гранули повністю не висохнуть, і маси матеріалу, що висушується, з точністю 0,01 гр.

Концентрація сухої речовини в гранулі в будь-який момент часу сушіння виражена у відсотках, визначається як відношення початкової маси гранул (до зволоження) до маси гранул у будь-який момент часу сушіння

$$X = \frac{m}{m_{\Gamma}} \cdot 100, \quad (4.5)$$

де m – початкова маса гранул (до зволоження), гр; m_{Γ} – маса гранул у будь-який момент часу сушіння, гр.

Для визначення вологовмісту вираз (4.1) варто записати у вигляді

$$W = 100 - \left(\frac{m}{m_{\Gamma}} \cdot 100 \right). \quad (4.6)$$

За значеннями часу тривалості експерименту та вологовмістів побудовані криві сушіння, які виражають залежність вмісту води від часу, які надані далі в п. 4.4.1. Також були визначені швидкість сушіння й необхідний час перебування матеріалу в апараті.

4.4. Узагальнення результатів

Установлення закономірностей, яким підкоряється процес випаровування води із гранульованого нітрату амонію, необхідно для визначення оптимальних умов (температура у зоні сушіння, початковий вологовміст) утворення пористої структури в гранулі при збереженні визначальних властивостей пористої гранули в припустимих межах (міцність, сипкість, всмоктуюча здатність).

4.4.1 Залежність вологовмісту матеріалу від часу сушіння

При початковому вологовмісті 1,0 % і температурах у зоні сушіння 125 °С, 130 °С і 135 °С були отримані дані, надані в табл. 4.3:

Таблиця 4.3 – Залежність концентрації матеріалу від часу сушіння при початковому вологовмісті 1,0 %

Концентрація								
t = 125 °С			t = 130 °С			t = 135 °С		
Час, хв	Маса, гр.	X, %	Час, хв	Маса, гр.	X, %	Час, хв	Маса, гр.	X, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	50,5	99,00	0	50,5	99,00	4	50,5	99
5	50,23	99,54	5	50,22	99,56	0	50,2	99,60
10	50,17	99,66	10	50,16	99,68	5	50,15	99,70
15	50,14	99,72	15	50,14	99,72	10	50,1	99,80
1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	50,12	99,76	20	50,12	99,76	20	50,06	99,88
25	50,1	99,80	25	50,09	99,82	25	50,03	99,94
30	50,08	99,84	30	50,07	99,86	30	50,01	99,98
35	50,06	99,88	35	50,06	99,88	35	50	100,00
40	50,05	99,90	40	50,05	99,90	40	50	100,00
45	50,03	99,94	45	50,03	99,94	45	---	---
50	50,02	99,96	50	50,01	99,98	50	---	---
55	50,01	99,98	55	50	100,00	55	---	---
60	50	100,00	60	50	100,00	60	---	---
65	50	100,00	65	50,12	99,76	65	---	---

У наступній стадії експерименту початкова вологість гранул була збільшена на 1 % мас.

При початковому вологовмісті 2,0 % і температурах у зоні сушіння 125 °С, 130 °С і 135 °С були отримані дані, надані в табл. 4.4:

Таблиця 4.4 – Залежність концентрації матеріалу від часу сушіння при початковому вологовмісті 2,0 %

Концентрація								
t= 125 °С			t= 130 °С			t= 135 °С		
Час, хв	Маса, гр.	X, %	Час, хв	Маса, гр.	X, %	Час, хв	Маса, гр.	X, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	51	98	0	51	98	4	51	98
5	50,72	98,58	5	50,5	99,01	0	50,45	99,11
10	50,56	98,89	10	50,31	99,38	5	50,22	99,56
15	50,45	99,11	15	50,23	99,54	10	50,13	99,74
20	50,3	99,40	20	50,18	99,64	20	50,11	99,78
25	50,25	99,50	25	50,15	99,70	25	50,08	99,84
30	50,17	99,66	30	50,12	99,76	30	50,07	99,86
35	50,15	99,70	35	50,1	99,80	35	50,06	99,88
40	50,14	99,72	40	50,07	99,86	40	50,04	99,92
45	50,13	99,74	45	50,05	99,90	45	50,03	99,94
50	50,07	99,86	50	50,01	99,98	50	50,01	99,98
55	50,03	99,94	55	50	100,00	55	50	100,00
60	50	100,00	60	50	100,00	60	50	100,00

При початковому вологовмісті 3,0 % і температурах у зоні сушіння 125 °С, 130 °С і 135 °С були отримані дані надані в табл. 4.3:

Таблиця 4.5 - Залежність концентрації матеріалу від часу сушіння при початковому вологовмісті 3,0 %

Концентрація								
t= 125 °С			t= 130 °С			t= 135 °С		
Час, хв	Маса, гр.	X, %	Час, хв	Маса, гр.	X, %	Час, хв	Маса, гр.	X, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	51,55	97,00	0	51,55	97	4	51,55	97
5	50,82	98,39	5	50,8	98,43	0	50,79	98,44
10	50,45	99,11	10	50,44	99,13	5	50,38	99,25
15	50,31	99,38	15	50,31	99,38	10	50,22	99,56
20	50,22	99,56	20	50,23	99,54	20	50,15	99,70
25	50,18	99,64	25	50,18	99,64	25	50,1	99,80

Продовж. табл. 4.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
30	50,15	99,70	30	50,15	99,70	30	50,07	99,86
35	50,12	99,76	35	50,11	99,78	35	50,05	99,90
40	50,1	99,80	40	50,07	99,86	40	50,03	99,94
45	50,08	99,84	45	50,05	99,90	45	50,01	99,98
50	50,05	99,90	50	50,02	99,96	50	50	100,00
55	50,03	99,94	55	50	100,00	55	---	---
60	50,02	99,96	60	50	100,00	60	---	---
65	50	100,00	65	---	---	65	---	---

На (рис. 4.7, 4.8 і 4.9) надані графіки вологовмісту матеріалу, що показують залежність від часу сушіння.

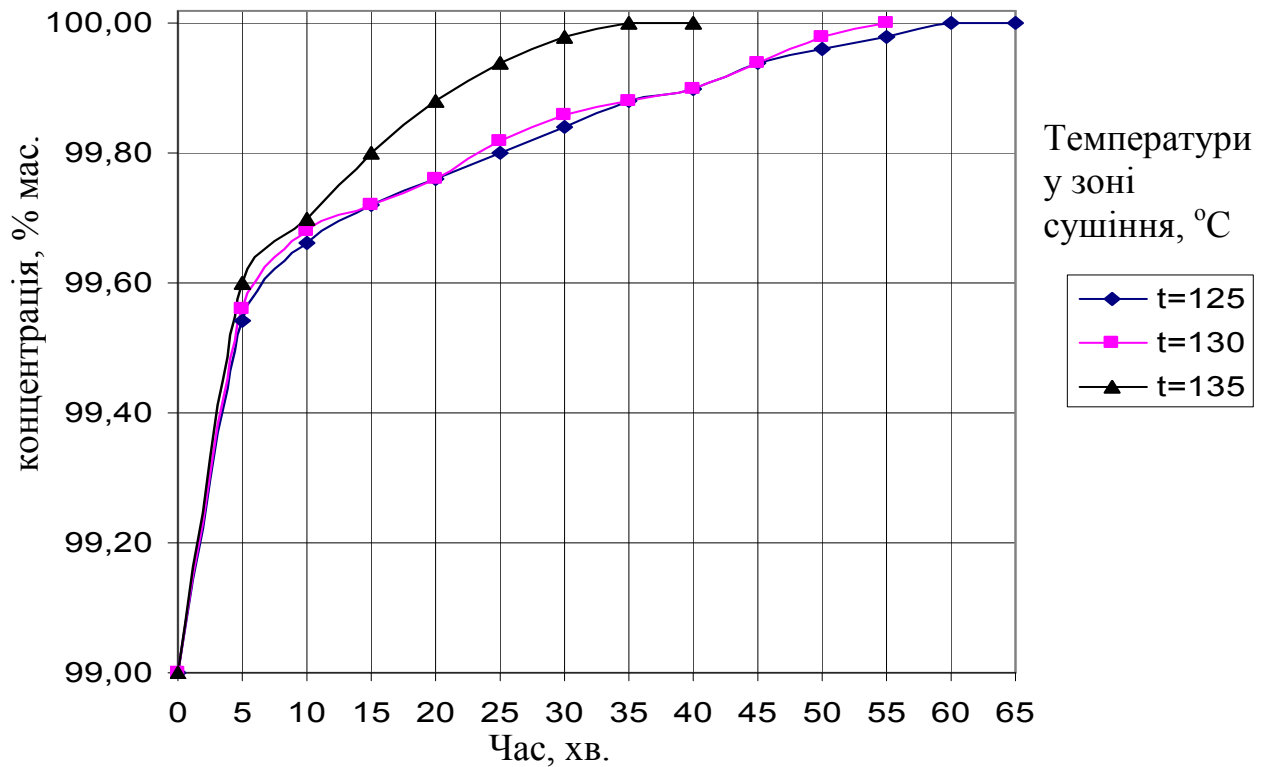


Рис. 4.7 – Залежність концентрації висушеного матеріалу від часу сушіння (початковий вологовміст матеріалу 1 %).

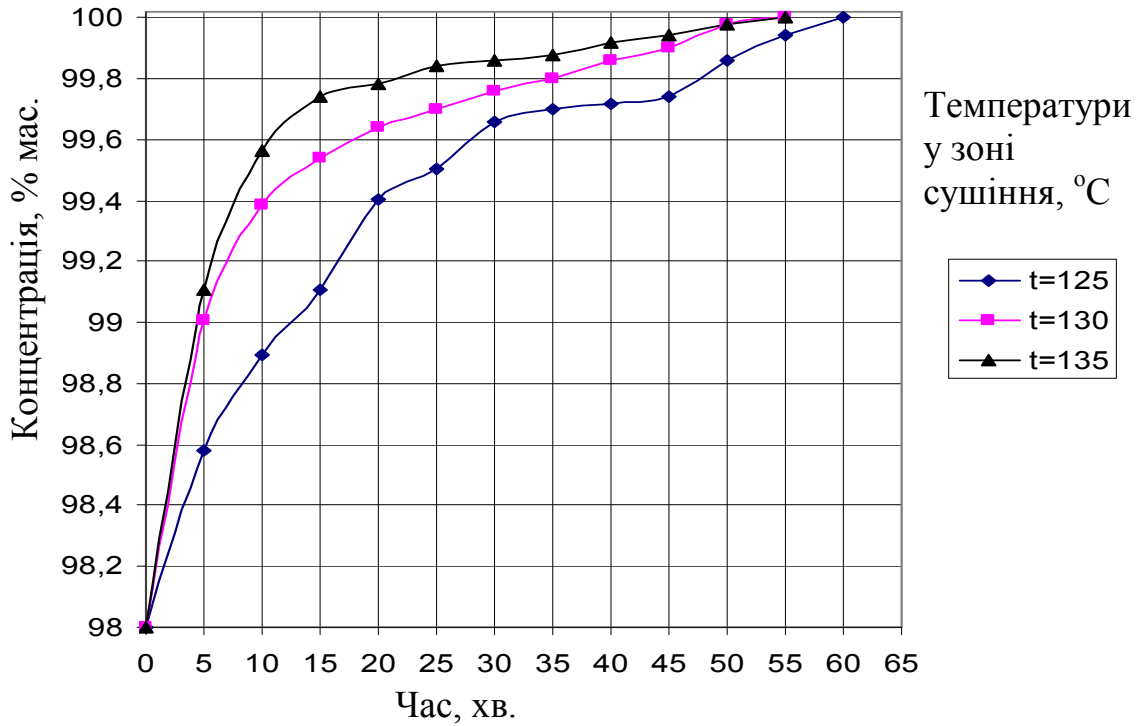


Рис. 4.8 – Залежність концентрації висушуваного матеріалу від часу сушіння, початковий вологовміст матеріалу 2 %.

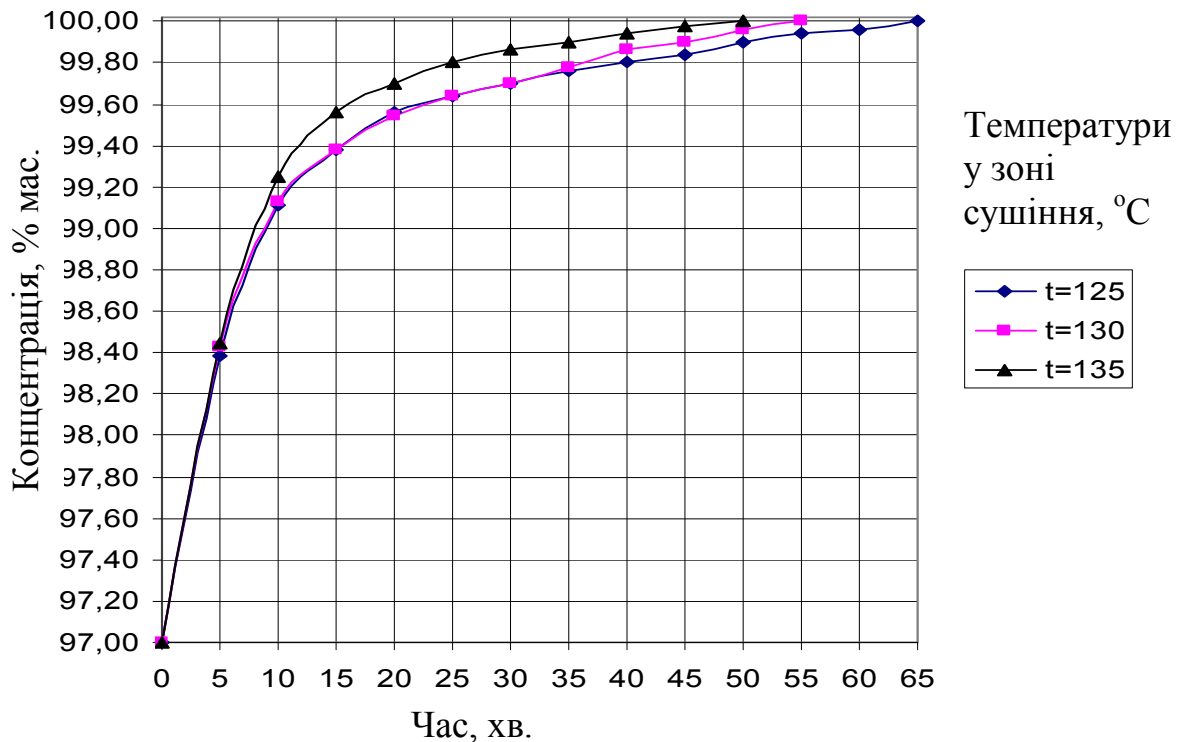


Рис. 4.9 – Залежність концентрації висушуваного матеріалу від часу сушіння, початковий вологовміст матеріалу 3 %.

З наведених вище графіків видно, що в перші 5 - 20 хвилин сушіння інтенсивність сушіння дуже висока, але в міру того, як вологи в гранулах стає менше, її видалення значно вповільнюється.

Отримані графіки для випадку нагрівання в стаціонарних умовах з достатньою для інженерного розрахунку точністю інтерполюються наступною залежністю:

$$X = \frac{[0,0382t + (X_0 - 4,85)]\tau^{0,0087}}{\tau^{0,00003t}}, \quad (4.7)$$

де X_0 – початкова концентрація гранули по твердій речовині, що надходить на нагрівання, t – температура у зоні сушіння, τ - час сушіння, X - концентрація гранули по твердій речовині.

4.4.2 Швидкість сушіння

Оскільки досліджувані гранули мають капілярнопористу структуру, для визначення коефіцієнта сушіння можна скористатися наближеним рівнянням сушіння [91]

$$\lg(W - W_p) = \lg A - \frac{1}{2,303} K \tau, \quad (4.8)$$

де W – вміст вологи до моменту часу τ , % мас; W_p – рівноважний вміст вологи, % мас; A – константа; K – коефіцієнт сушіння залежний від режиму сушіння, год⁻¹.

Значення коефіцієнта сушіння перебуває по тангенсу кута нахилу прямих, побудованих у координатах $\lg(W - W_p)$ і τ . Коефіцієнт K пропорційний швидкості сушіння U у першому періоді, коли її значення не змінюється.

На рис. 4.10 показаний графік побудований у координатах $\lg(W - W_p)$ і τ , з певними кутами нахилу, для випадку: $t = 130$ °С і $W = 2,0$ %.

За отриманими графічним методом кутам нахилу прямих (рис. 4.10), можна визначити коефіцієнт сушіння.

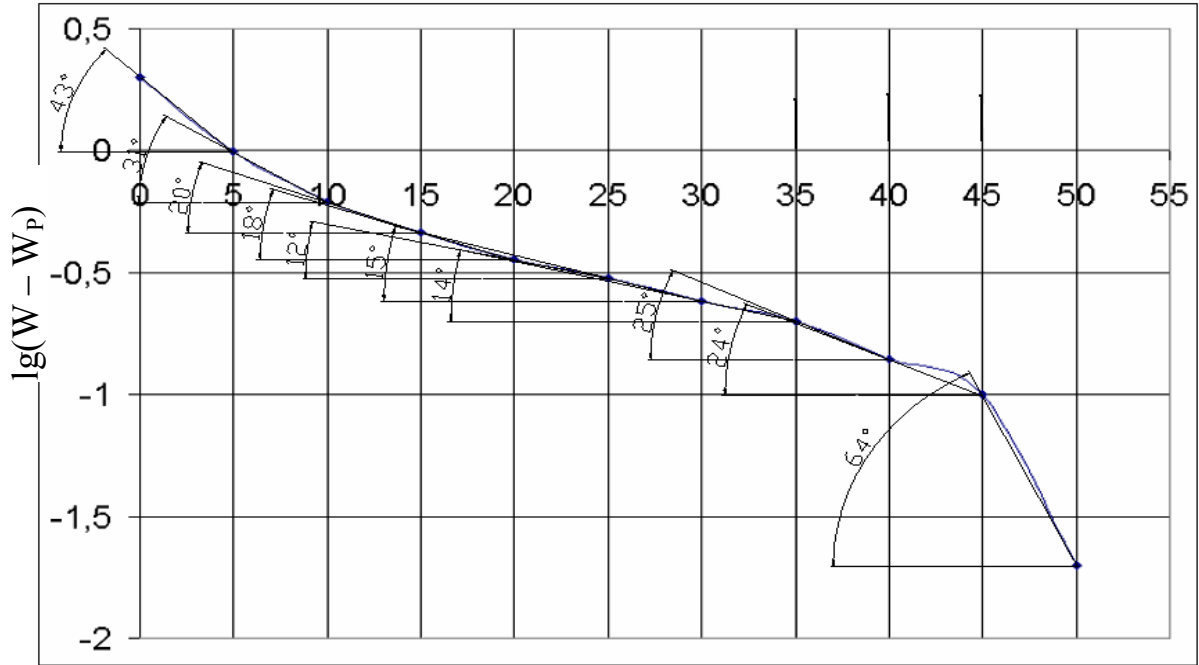


Рис. 4.10 – Залежність $\lg(W - W_p)$ від τ .

На рис. 4.11 показаний графік залежності коефіцієнта сушіння гранульованої аміачної селітри від вологовмісту, який з підвищенням температури у перший період збільшується (рис. 4.12), а рівноваговий вологовміст зменшується.

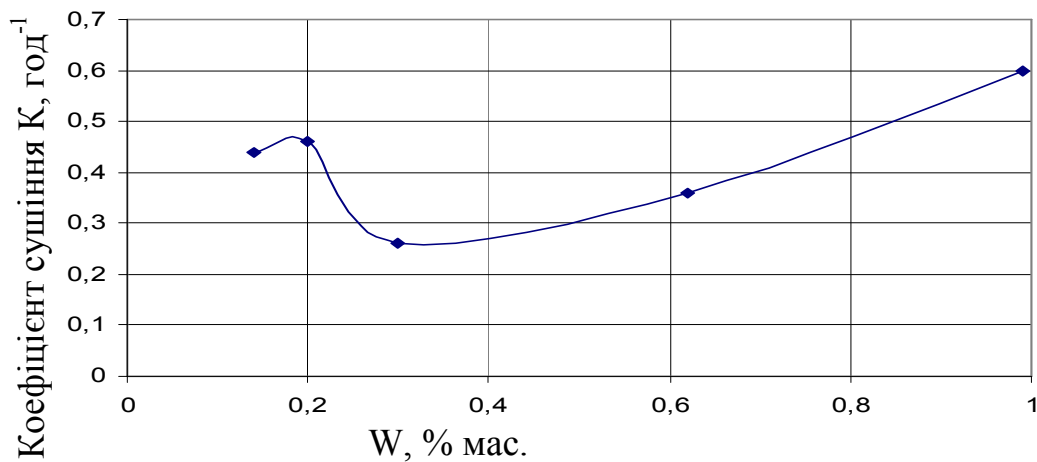


Рис. 4.11 – Залежність коефіцієнта сушіння від вологовмісту

За даними табл. 4.2 визначені швидкості сушіння й побудований графік швидкості сушіння гранульованої аміачної селітри при початковому вмісті вологи 2,0 % і при температурі 130 °С, (рис. 4.12).

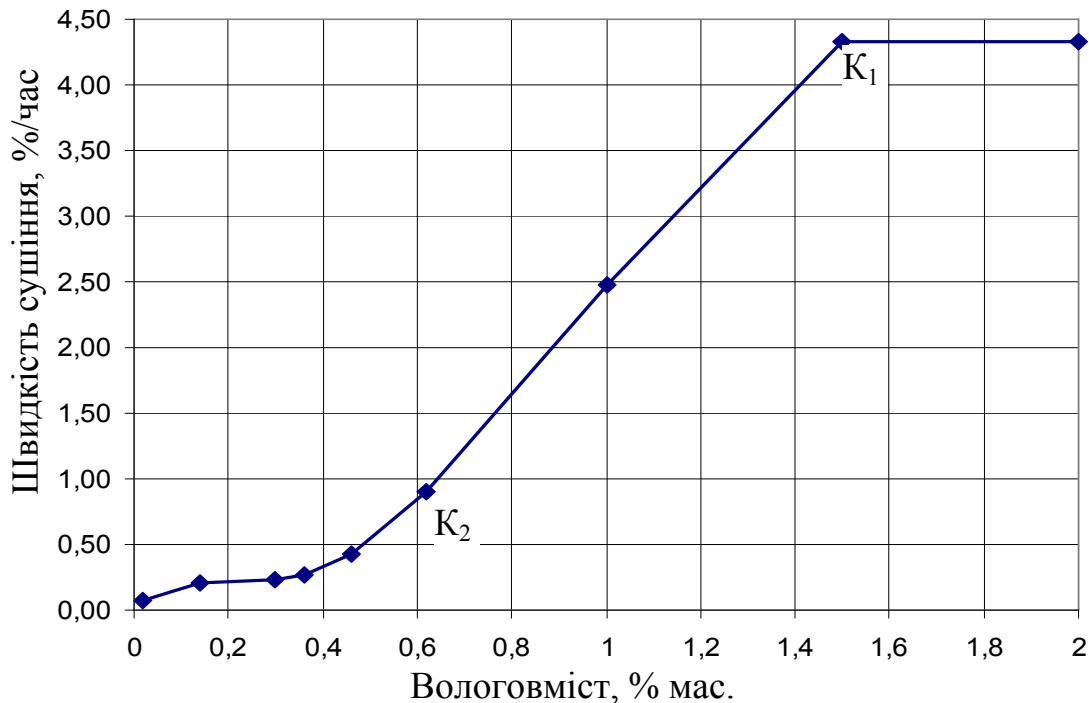


Рис. 4.12 – Залежність зміни швидкості сушіння гранули аміачної селітри від вологовмісту гранули.

Крива швидкості сушіння (рис. 4.12) має вигляд, характерний для речовин з капілярнопористою структурою [91].

Вид кривої на рис. 4.12 характерний для випадку, коли в матеріалі, що висушується, немає градієнта температур. У цьому випадку крива швидкості сушіння має три характерних ділянки. У початковий період сушіння вологовміст аміачної селітри зменшується за лінійним законом: крива сушіння на початковій ділянці має вигляд прямої. Отже, швидкість сушіння буде величиною постійною. Цей перший період сушіння називають періодом постійної швидкості [7]. На рис. 4.12 йому відповідає ділянка кривої швидкості сушіння, паралельна горизонтальній осі. Потім, починаючи з точки для якої характерна вологість 1,5 %, названою першою критичною вологістю,

якій відповідає перша критична точка $K1$, швидкість сушіння зменшується. Цей другий період називається періодом падаючої швидкості. Після першої критичної точки швидкість сушіння зменшується лінійно до точки, для якої характерна вологість 0,62 %, після якого зміна швидкості сушіння зображується кривою, зверненою опуклістю до осі абсцис. Точка переходу прямої у криву відповідає другій критичній точці $K2$. Точка перетинання кривої швидкості сушіння з віссю абсцис відповідає рівноважному значенню вологовмісту Wp .

З підвищенням температури значення коефіцієнта сушіння й швидкості сушіння в перший період збільшуються, а рівноважний вологовміст зменшується, тому що випаровування вологи починається від поверхні гранули до її центра.

Особливості сушіння гранул аміачної селітри визначаються наступними факторами. Аміачна селітра добре розчинна у воді, сполука розчину залежить від температури, а його кількість - від початкового вмісту вологи. Можна припустити, що в процесі сушіння міняється структура пор гранул, волога в якій перебуває в рідкому й пароподібному станах. Ці фактори визначають механізм випаровування вологи із гранульованого нітрату амонію.

Швидкість сушіння в період постійної швидкості визначається різницею парціальних тисків пар води в газі, що осушує, і над насиченим розчином селітри [1]. З підвищенням температури парціальний тиск пар води над насиченим розчином збільшується і швидкість сушіння зростає (рис. 4.12).

У міру випаровування вологи границя між сухим і вологим матеріалом буде переміщатися до центра гранули. У цьому випадку визначальний вплив на швидкість сушіння буде робити швидкість дифузії пар води в порах гранул. Переходу від випаровування вологи з насичених розчинів до випаровування вологи з пор гранульованого нітрату амонії відповідає критичний вологовміст (точка $K1$ на рис. 4.12). У відповідність із загальноприйнятою фізичною моделлю [1], ділянка кривої швидкості сушіння від $K1$ до $K2$ – відповідає, випаровування вологи з макропор (радіус $> 10^{-7}$ м) [1], а ділянка кривої від $K2$

до перетинання з віссю абсцис (рівноважний вологовміст W_p) – випаровування води з перехідних пор з радіусом, меншим 10^{-7} м.

4.4.3 Порівняльна оцінка характеристик гранул різної пористості.

У ході експерименту гранульована аміачна селітра піддавалася зволоженню і сушінню, у результаті чого були отримані гранули з пористою структурою. Вихідні й отримані гранули досліджувалися на механічну міцність, всмоктуючу здатність, а також визначалася пористість гранул.

На рис. 4.13 показана схема приладу, широко застосовувана для визначення міцності гранул аміачної селітри.

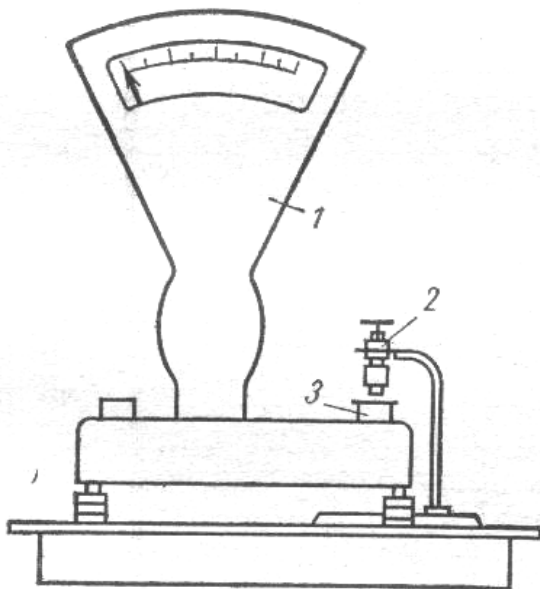


Рис. 4.13 – Загальний вид приладу для визначення міцності гранул: 1 – ваги циферблатні; 2 – ручний прес; 3 – підставка.

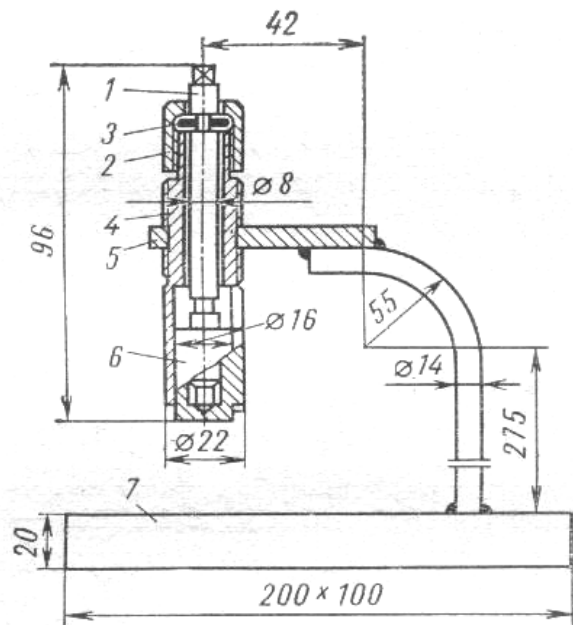


Рис. 4.14 – Мікропрес для раздавлювання гранул: 1 – гвинт; 2 – накидна гайка; 3 – “сухар”; 4 – корпус; 5 – фланець; 6 – поршень; 7 – станина.

Визначення механічної міцності гранул на роздавлювання здійснюється за допомогою екстензометра ІПГ-1 або приладу типу МІП-10-1, що забезпечують вимірювання міцності в діапазоні 0 - 1500 г на гранулу при швидкості підвищення навантаження не більше 1,5 мм/с за ДСТ 2-85. Прилад складається із циферблатних торговельних ваг марки ВТЦ-10 типу ВНЦ

(граничне навантаження 10 кг, ціна розподілу шкали 5 г) і мікропресу. Пристрій мікропресу показаний на рис. 4.14. Поверхня поршня й підставки відполірована. Поршень 6 пересувається по вертикалі нагору і вниз обертанням гвинта 1, що забезпечує зміну навантаження на випробовувану гранулу.

Пробу селітри витримували при кімнатній температурі в закритій ємності протягом 12 годин. Для випробування відсівали 20 - 30 г гранул від 2 до 3 мм. Від кожної проби пінцетом відбирали по 20 гранул, можливо, близьких за розміром і формою, і розміщували в скляні бюкси із притертими кришками. Потім гранули послідовно переносили на прилад і визначали зусилля, необхідне для руйнування кожної гранули.

Механічна міцність гранул G у грамах на гранулу обчислюється за формулою

$$G = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_{20}}{20}, \quad (4.9)$$

де $P_1, P_2, P_3 \dots P_{20}$ – величина зусиль роздавлювання гранул, г.

Отримані дані механічної міцності гранул наведені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Механічна міцність гранул

Міцність гранул, г/гранулу								
x = 1 %			x = 2 %			x = 3 %		
t=125 °C	t=130 °C	t=135 °C	t=125 °C	t=130 °C	t=135 °C	t=125 °C	t=130 °C	t=135 °C
335	340	340	305	315	315	235	240	240

На рис. 4.15 наведена залежність міцності гранул від початкового вологовмісту гранул. Із графіка видно, що з підвищенням початкового вологовмісту гранул їх механічна міцність знижується.

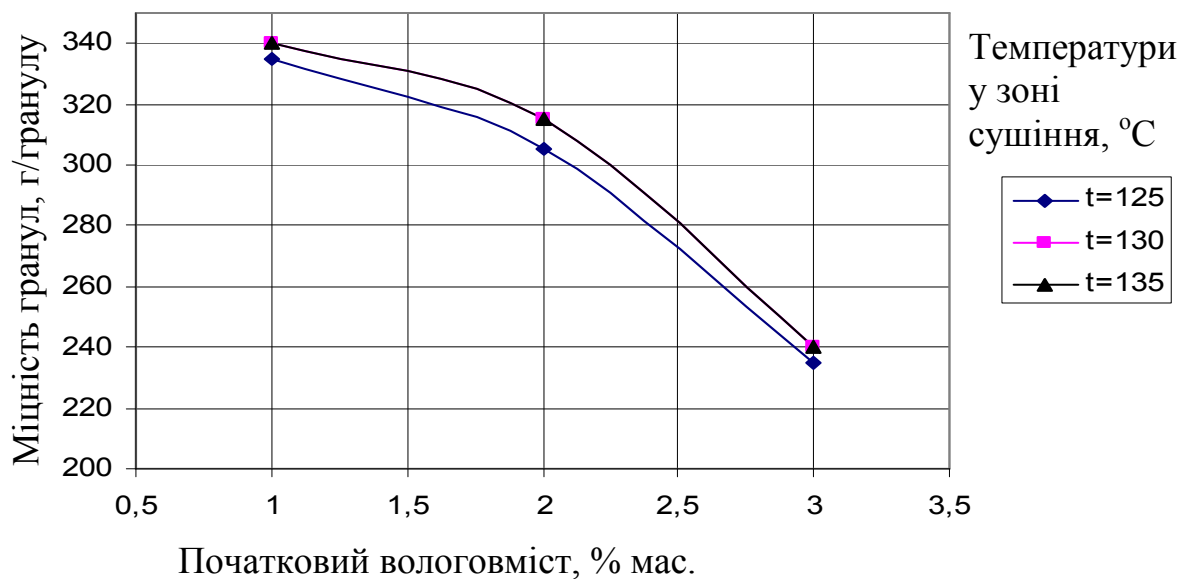


Рис. 4.15 – Залежність міцності гранул від початкового вологовмісту гранул.

Зниження міцності гранул при початковому вологовмісті від 1 до 2 % відбувається плавно і не на значну величину, тоді як при початковому вологовмісті від 2 до 3 % пониження міцності гранул відбувається стрімко і падає до критичної відмітки.

Одним з основних показників, що характеризують якість пористої гранульованої аміачної селітри, є вбираюча здатність гранул стосовно рідкого палива (наприклад, солярового масла). Цей показник виражається числом грамів, що може поглинути 100 г гранул (г/100 г). Він визначається за методикою, передбаченою ТУ 6-03-372-74 на гранульовану пористу аміачну селітру марки «П».

Наважка близько 100 г аміачної селітри, попередньо відсіяної від дрібних фракцій через сито з отворами 0,5 мм і зваженої з точністю до 0,01 г, через скляну лійку засипали в чисту суху бюретку із краном, установлену в штативі у вертикальному положенні. Перед дослідом у бюретку опускали 5 - 6 найбільш великих гранул селітри для запобігання закупорювання отвору в крані дрібними гранулами. Потім засипали іншу наважку. У скляному стаканчику відважували 50 г солярового масла з точністю до 0,01 г, яке потім без втрат

переносили в бюретку, заповнену наважкою аміачної селітри, і спостерігали, щоб масло рівномірно змочувало всі гранули селітри по висоті бюретки й верхній рівень його був вище рівня селітри на 3 - 4 см.

Стаканчик із соляровим маслом, що залишилося, ставили під краном бюретки. Просочення гранул селітри соляровим маслом у бюретці при закритому її крані тривали 20 хв, після чого кран бюретки відкривали й залишали на 1,5 год вільно стікати масло, що не вбралося в гранули. Потім кран бюретки закривався й удруге зважувався скляний стаканчик з маслом.

Виражена у відсотках різниця маси масла в стаканчику до й після досліду приймається за величину, що характеризує вбираючу здатність гранульованої аміачної селітри.

$$BC = \frac{m_{\text{мн}} - m_{\text{мк}}}{m_{\text{мн}}} \cdot 100, \quad (4.10)$$

де $m_{\text{мн}}$ – маса масла до досліду; $m_{\text{мк}}$ – маса масла після досліду.

Результати досліджень отриманих гранул на вбираючу здатність надані в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Вбираюча здатність гранул

Вбираюча здатність, г/100г								
x = 1 %			x = 2 %			x = 3 %		
T=125 °C	T=130 °C	T=135 °C	T=125 °C	T=130 °C	T=135 °C	T=125 °C	T=130 °C	T=135 °C
11,5	12,0	12,0	15,0	15,3	15,2	17,1	17,2	17,2

На рис. 4.16 показана залежність вбираючої здатності гранул від початкового вологовмісту гранул. Із графіка видно, що з підвищенням початкового вологовмісту гранул вбираюча здатність гранул зростає.

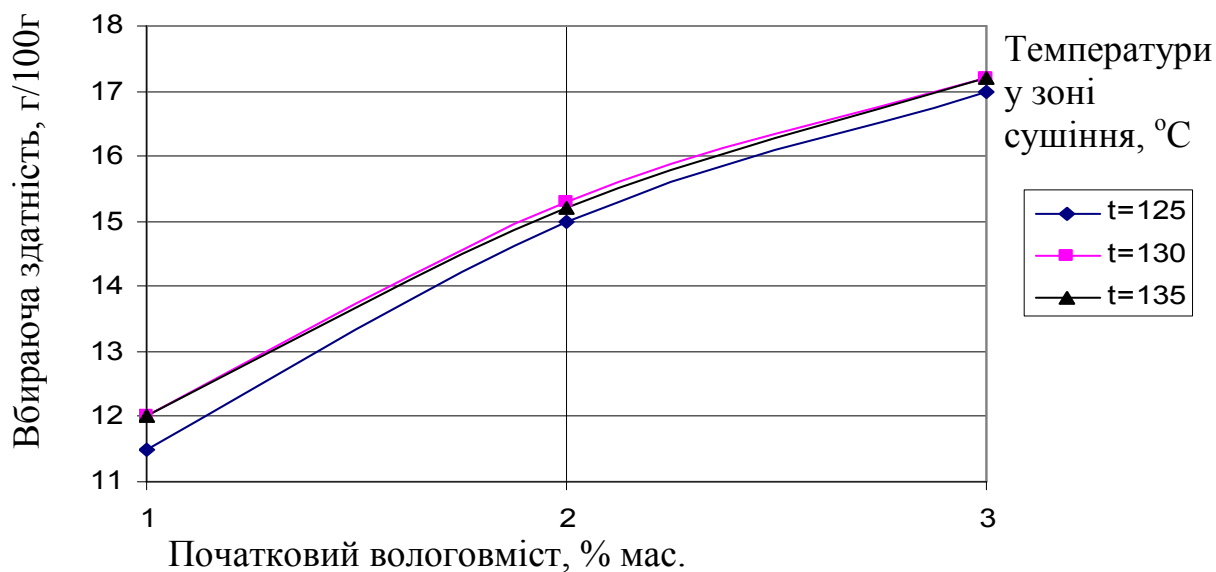


Рис. 4.16 – Залежність вбираючої здатності гранул від початкового вологовмісту гранул.

Підвищення вбираючої здатності гранул з підвищенням початкового вологовмісту, імовірно, пояснюється тим, що волога, попадаючи в гранулу, розчиняє деяку кількість речовини формуючу гранулу (нітрат амонію) і потім, випаровуючись, утворює порожнечі (пори). Внаслідок цього вбираюча здатність гранул аміачної селітри підвищується (рис. 4.16), однак міцність таких гранул не висока, що показано на рис. 4.15, через численні порожнечі, що утворилися усередині гранули.

Для порівняння, вбираюча здатність звичайних гранул аміачної селітри не перевищує 5г/100г [1].

Показником якості продукту є також величина, що виражає пористість гранул, що приблизно визначається об'ємним методом [1].

У бюретку на 25 мл, оснащену краном, наливали певний об'єм криоскопічного бензолу (V_1). Потім у неї всипали приблизно 10 г селітри й через 1 — 2 хв фіксували об'єм, що змінився в бюретці (V_2). Потім відкривався кран, спускався бензол, що перебуває між гранулами селітри, у другу бюретку й заміряли його об'єм (V_3). Пористість в % обчислювалася за формулою:

$$P = \frac{V_1 - V_3}{V_2 - V_3} \cdot 100. \quad (4.11)$$

Цим методом фіксувалися тільки відкриті пори, у які може проникнути рідке паливо.

Результати досліджень отриманих гранул на пористість надані в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Пористість гранул

Пористість гранул, %								
x = 1 %			x = 2 %			x = 3 %		
T=125 °C	T=130 °C	T=135 °C	T=125 °C	T=130 °C	T=135 °C	T=125 °C	T=130 °C	T=135 °C
15,7	16,2	16,2	18,3	18,5	18,7	20,9	21,1	21,0

На рис. 4.17 показана залежність пористості гранул від початкового вологовмісту гранул. Із графіка видно, що чим більше початковий вологовміст гранул, тим більше пористість отриманих гранул. Це можна пояснити тим же, що з підвищенням початкового вологовмісту підвищується вбираюча здатність гранул, що було описано вище.

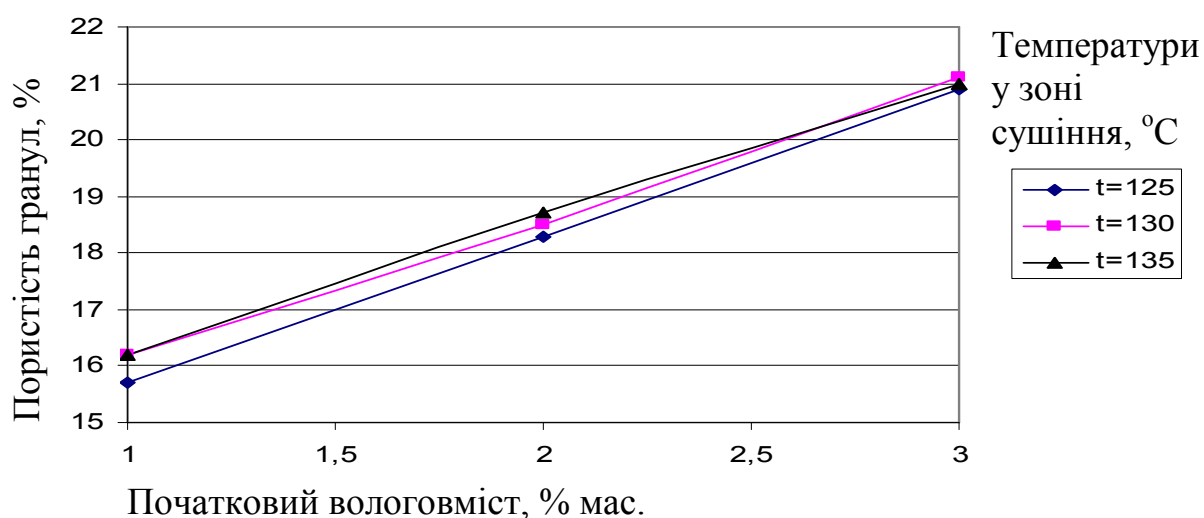


Рис. 4.17 – Залежність пористості гранул від початкового вологовмісту гранул.

Розглянувши графік, наведений на рис. 4.17, можна зробити висновок, що залежність пористості гранул від початкового вологовмісту майже лінійна, особливо для гранул висушуваних при температурах 125 °С і 130 °С.

Для порівняння, у звичайної гранульованої аміачної селітри пористість гранул не перевищує 8 - 10 % [1].

Для візуальної оцінки зміни структури гранули після її зволоження і потім висушування, були проведені дослідження під мікроскопом, які доводять правоту припущень про природу утворення пор в гранулі.

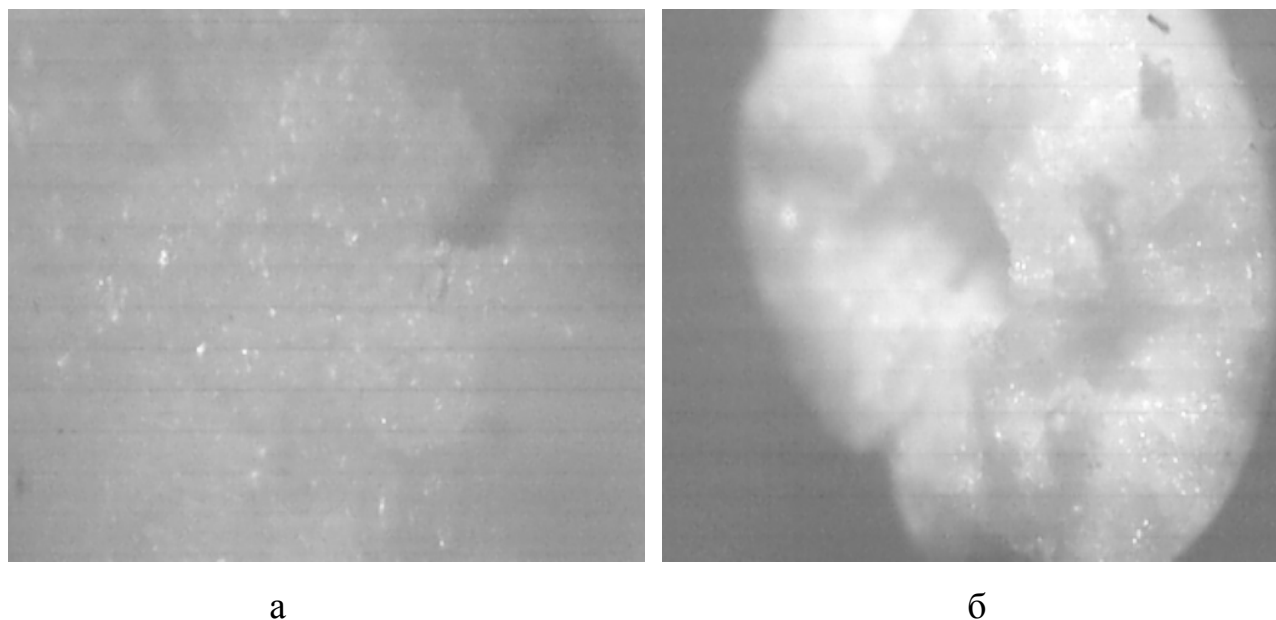


Рис. 4.18 – Фотографії гранул

а - зріз гранули до сушіння; б - зріз гранули після сушіння.

На рисунку 4.18.а показаний зріз гранули аміачної селітри до експерименту. На рис. 4.18.б показаний зріз гранули аміачної селітри після експерименту. На рис. 4.18.б видно порожнечі між кристалами аміачної селітри (пори), що утворилися унаслідок випаровування вологи з гранули, чого не можна спостерігати на рис. 4.18.а.

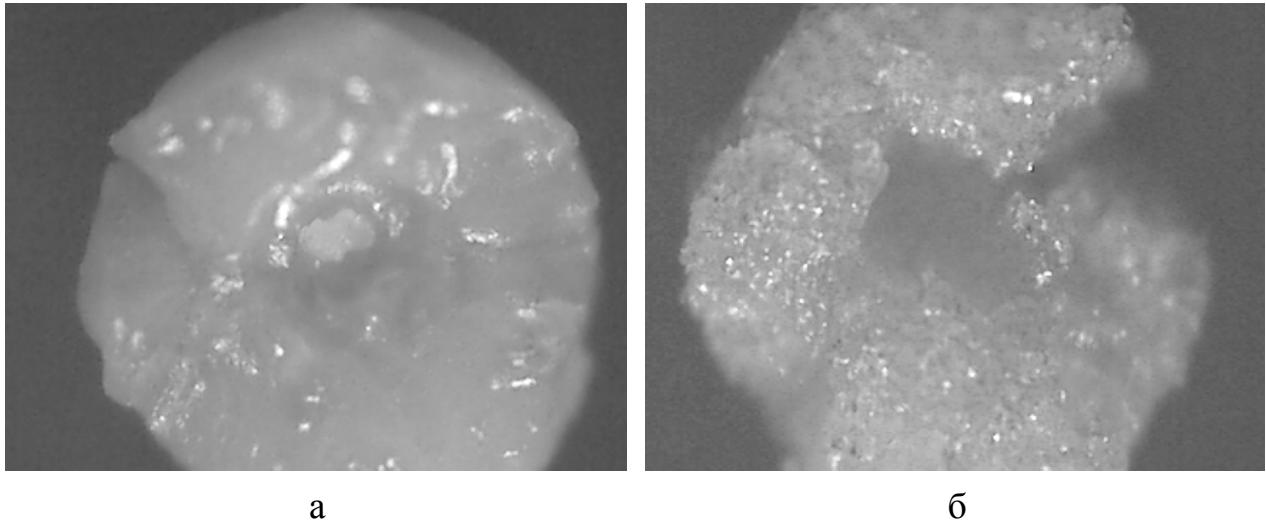


Рис. 4.19 – Фотографії гранул а - зріз гранули до сушіння; б - зріз гранули після сушіння.

На рисунку 4.19 показані фотографії гранул до й після сушіння. На фотографії гранули показаної на рис 4.19.а, в центрі гранули добре видно порожнину – результат випаровування залишкової вологи при виробництві гранул баштовим способом, що так само спостерігається й на рис 4.19.б. Інша поверхня зрізу гранули, при такому збільшенні, виглядає як суцільна поверхня, але на рисунку 4.19.б при тім же збільшенні добре помітна пориста поверхня зрізу гранули, що наочно доводить утворення пористої структури в гранулі.

4.5 Методика проведення досліджень в умовах псевдозрідженого шару

Для вимірювання витрати повітря, що подається в апарат з киплячим шаром, на трубопроводі перед теплообмінником, передбачений спеціальний вузол для виміру повного тиску p і статичного тиску p_{cm} (трубки Пито), що з'єднаний імпульсними трубками з мікроманометром. При його установці дотримувалися вимоги з точності вимірів (такі, як наявність прямої ділянки рівного 10 діаметрам до виміру й 5 діаметрам після місця виміру). Погрішність вимірів цього вузла становить не більше ± 1 мм спиртового стовпчика. Як рідина в мікроманометрі використаний етиловий спирт (C_2H_5OH).

Динамічний тиск (швидкісний напір) $p_{дин}$, Па, обчислюється із залежності

$$P_{дин} = p - p_{ст}, \quad (4.12)$$

де p – повний тиск, Па; $p_{ст}$ – статичний тиск, Па.

Швидкість руху газового потоку в газопроводі V , м/с, визначається із залежності [8]

$$V = \sqrt{2gH \frac{\rho_c - \rho_z}{\rho_z}}, \quad (4.13)$$

де ρ_z – щільність газу (повітря $\rho_z = 1,21$ кг/м³ при $T = 293$ °К, $p = 101,3 \cdot 10^3$ Па), кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²; ρ_c – щільність спирту ($\rho_c = 789$ кг/м³ при $T = 293$ °К, $p = 101,3 \cdot 10^3$ Па), кг/м³.

Витрата газу (повітря) Q , м³/с, на експериментальній установці

$$Q = VS, \quad (4.14)$$

де V – середня швидкість газу, розрахована для перетину трубопроводу, м/с; S – площа поперечного перерізу трубопроводу в точці виміру, м².

Для контролю температури газового потоку після теплообмінника, на вході в апарат з киплячим шаром установлений термометр. Термометр також установлений перед теплообмінником і на виході з апарата з киплячим шаром.

Наважка аміачної селітри, попередньо висушена й зволожена до необхідної вологості міститься в апарат з киплячим шаром, де здійснюється процес сушіння заданий час, після чого наважка зважується й визначається вологість гранул. Якщо волога вилучена не вся, експеримент повторюється з новою наважкою, але з більшим часом перебування її в апараті. Експеримент

проводиться з тими самими параметрами температури й витрати газу доти, поки не буде визначений мінімальний час повного висихання гранул.

4.6 Узагальнення результатів експерименту

Експериментальне моделювання процесу сушіння аміачної селітри в газовому потоці необхідно для визначення часу сушіння при різних термодинамічних параметрах.

Після проведення серії досліджень отримані значення часу сушіння надані в табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – **Значення часу сушіння**

$t, ^\circ\text{C}$	$x, \%$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$\tau, \text{ с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$x, \%$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$\tau, \text{ с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$x, \%$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$\tau, \text{ с}$
90	3,0	0,015	268	90	2,0	0,015	240	90	1,0	0,015	205
95	3,0	0,015	231	95	2,0	0,015	200	95	1,0	0,015	193
100	3,0	0,015	215	100	2,0	0,015	191	100	1,0	0,015	180
90	3,0	0,02	251	90	2,0	0,02	235	90	1,0	0,02	197
95	3,0	0,02	220	95	2,0	0,02	197	95	1,0	0,02	180
100	3,0	0,02	210	100	2,0	0,02	187	100	1,0	0,02	167

При використанні під час сушіння гранул, зволжених більше 3 %, в апараті не утвориться киплячий шар і гранули, злипаючись між собою, при висиханні утворять монолітний корж.

На рис. 4.20 показані залежності часу сушіння від температури у зоні сушіння для гранул з початковим вологовмістом 1, 2 і 3 % мас. при витратах повітря 0,015 і 0,02 м³/с.

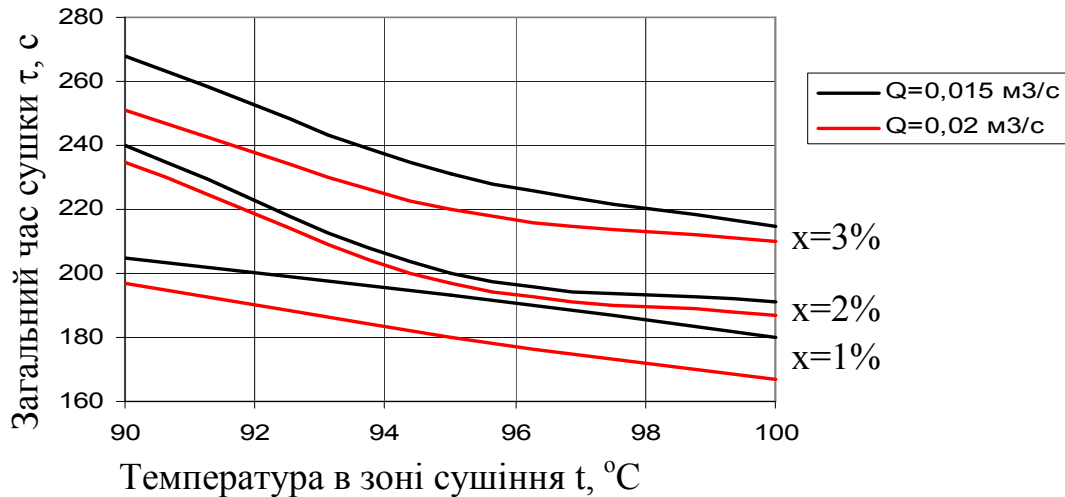


Рис. 4.20 – Залежності часу сушіння від температури у зоні сушіння для гранул з різними початковим вологовмістом.

З наведених графіків показаних на рис. 4.20 видно, що для гранул, які піддавалися сушінню з початковим вологовмістом 1 %, залежність часу сушіння від температури у зоні сушіння майже лінійна, як при витраті теплоносія 0,015 м³/с так і при 0,02 м³/с. Для гранул, що піддавалися сушінню з початковим вологовмістом 2 %, час сушіння в діапазонах температур 95 – 100 °C змінювався не значно, у межах 10-ти секунд. Однак, під час сушіння в діапазонах температур 90 – 95 °C змінювався в межах 45-ти секунд. Аналогічно міннявся час сушіння й для гранул з початковим вологовмістом 3 %.

Гранули досліджувалися на механічну міцність, всмоктуючу здатність, а так само визначалася пористість гранул за наведеними вище методиками.

Механічна міцність гранул G у грамах на гранулу обчислюється за формулою (4.9). Отримані дані наведені в табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Механічна міцність гранул

Міцність гранул, г/гранулу								
x = 1 %			x = 2 %			x = 3 %		
T=90 °C	T=95 °C	T=100 °C	T=90 °C	T=95 °C	T=100 °C	T=90 °C	T=95 °C	T=100 °C
340	350	350	310	320	320	245	255	250

На рис. 4.21 наведена залежність міцності гранул від початкового вологовмісту гранул і температур у зоні сушіння. Із графіка видно, що з підвищенням початкового вологовмісту гранул їх механічна міцність знижується.

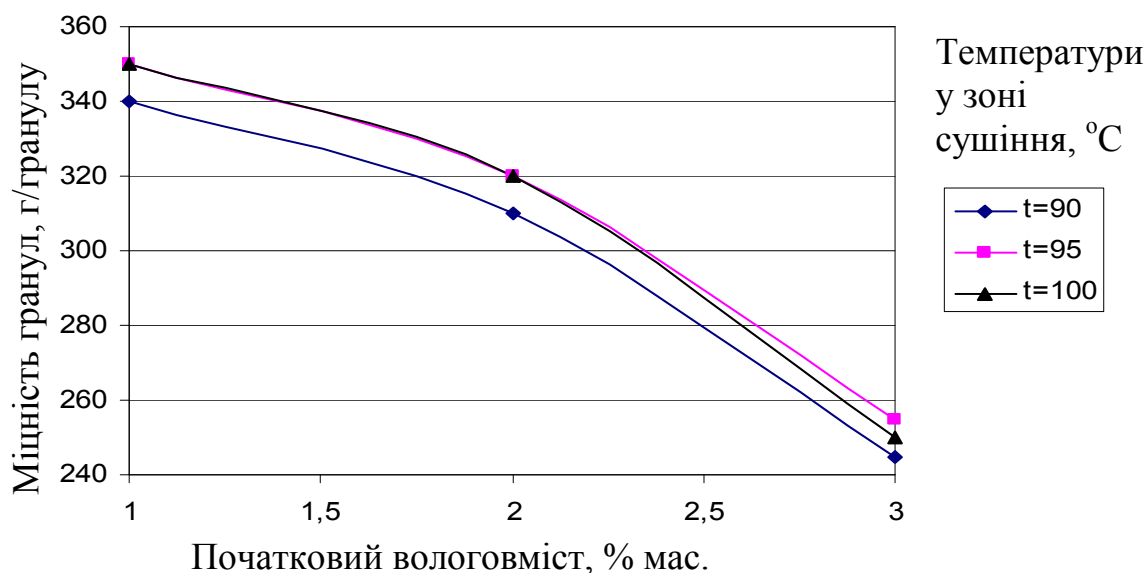


Рис. 4.21 – Залежність міцності гранул від початкового вологовмісту гранул і температур у зоні сушіння.

Зниження міцності гранул при початковому вологовмісті від 1 до 2 % відбувається плавно і не на значну величину, тоді як при початковому вологовмісті від 2 до 3 % зниження міцності гранул відбувається стрімко і падає до критичної відмітки.

Результати досліджень отриманих гранул на вбираючу здатність надані в табл. 4.11.

Таблиця 4.11 – Вбираюча здатність гранул

Вбираюча здатність, г/100г								
x = 1 %			x = 2 %			x = 3 %		
T=90 °C	T=95 °C	T=100 °C	T=90 °C	T=95 °C	T=100 °C	T=90 °C	T=95 °C	T=100 °C
11,0	12,1	12,2	14,1	14,8	15,0	16,9	17,1	17,2

На рис. 4.22 показана залежність вбираючої здатності гранул від початкового вологовмісту гранул і температур у зоні сушіння. Із графіка видно, що з підвищенням початкового вологовмісту гранул вбираюча здатність гранул зростає.

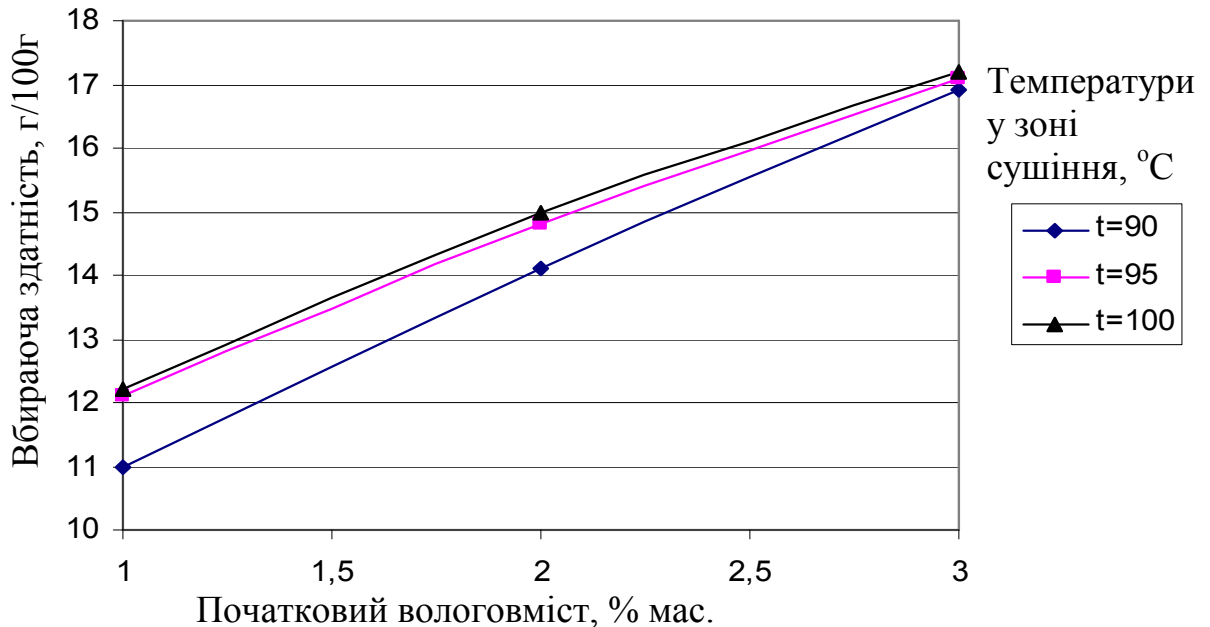


Рис. 4.22 – Залежність вбираючої здатності гранул від початкового вологовмісту гранул і температур у зоні сушіння.

Підвищення вбираючої здатності гранул з підвищенням початкового вологовмісту пояснюється тим, що волога, потрапляючи в гранулу, розчиняє деяку кількість речовини, що формує гранулу (нітрат амонію) і потім, випаровуючись, утворює порожнечі (пори). Внаслідок цього вбираюча здатність гранул аміачної селітри підвищується (рис. 4.22), однак міцність таких гранул не висока, що показано на рис. 4.21, через численні порожнечі, що утворилися усередині гранули.

Результати досліджень отриманих гранул на пористість надані в табл. 4.12.

Таблиця 4.12 – Пористість гранул

Пористість гранул, %								
x = 1 %			x = 2 %			x = 3 %		
T=90 °C	T=95 °C	T=100 °C	T=90 °C	T=95 °C	T=100 °C	T=90 °C	T=95 °C	T=100 °C
15,4	15,9	16,0	17,8	18,2	18,3	19,9	20,1	20,0

На рис. 4.23 показана залежність пористості гранул від початкового вологовмісту гранул і температур у зоні сушіння. Із графіка видно, що чим більше початковий вологовміст гранул, тим більше пористість отриманих гранул. Це можна пояснити тим же, що з підвищенням початкового вологовмісту підвищується вбираюча здатність гранул, що було описано вище.

Розглянувши графік, наведений на рис. 4.23, можна зробити висновок, що залежність пористості гранул від початкового вологовмісту майже лінійна, особливо для гранул, висушуваних при температурах 90 °C і 95 °C.

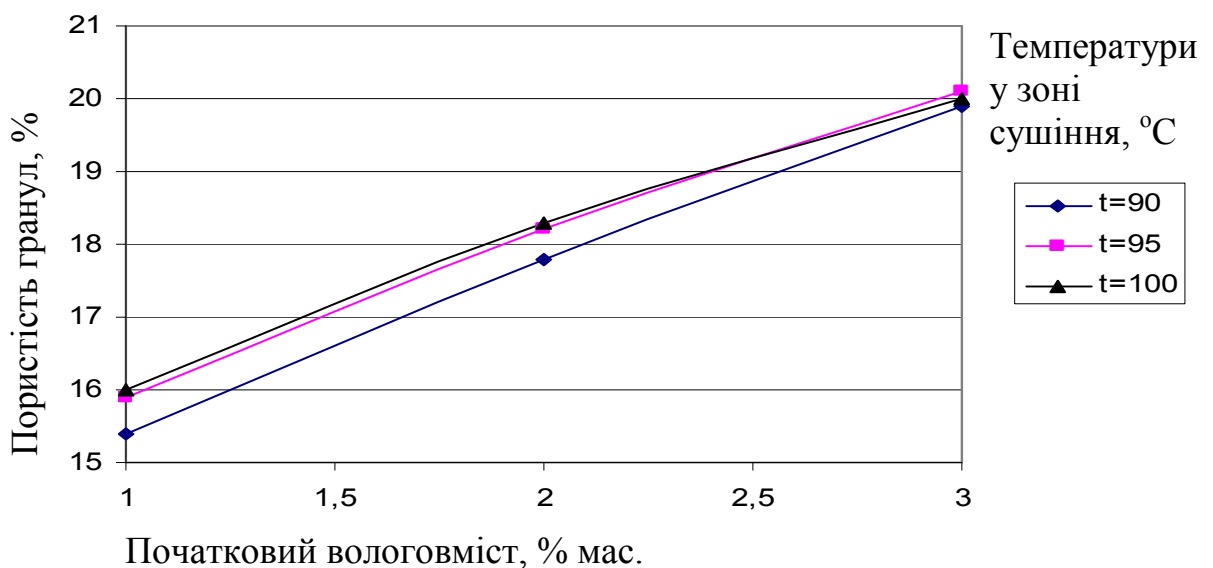


Рис. 4.23 – Залежність пористості гранул від початкового вологовмісту гранул і температур у зоні сушіння.

Прівнявши результати досліджень, наведених у таблицях 4.6, 4.7, 4.8 з результатами, наведеними в таблицях 4.10, 4.11, 4.12, можна зробити висновок, що метод сушіння незначною мірою впливає на такі показники якості, як

міцність гранул, вбираючи здатність і пористість, однак при сушінні в псевдозрідженому шарі значно скорочується час сушіння.

4.7 Співставлення результатів експерименту та моделювання за допомогою програмних продуктів Flow Vision 2003 demo

Для одержання розподілу температур по перетину гранули, без урахування специфіки охолодження матеріалу та додаткового виділення або поглинання тепла, може бути використано програмний комплекс Flow Vision 2003 demo [23]. У результаті застосування даного програмного комплексу були отримані дані розподіли температур по гранулі за деякий відрізок часу.

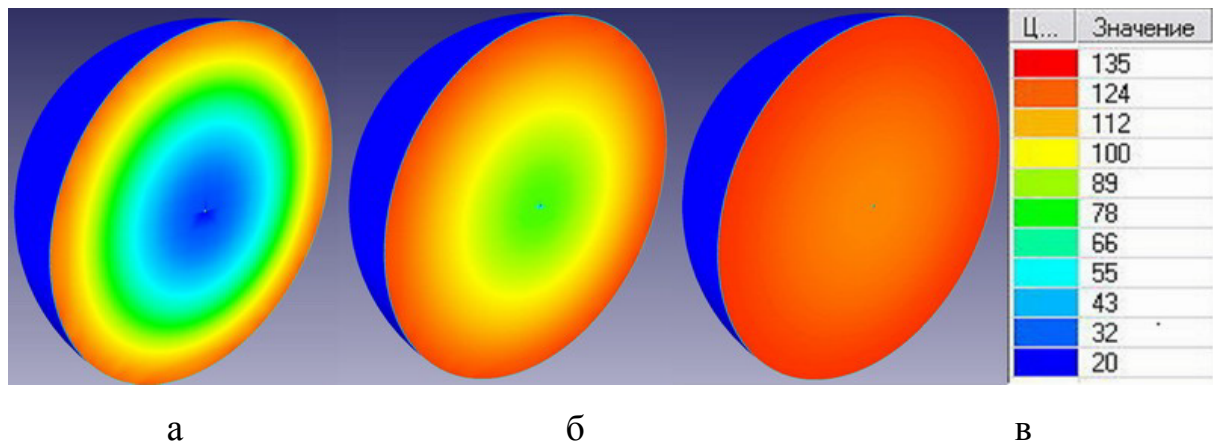


Рис. 4.24 – Термограми; а - через 60 сек.; б - через 120 сек.; в - через 180 сек.

На рис. 4.24 наведена графічна інтерпретація розрахунку в програмному комплексі Flow Vision 2.2. Наведені термограми показують, як із часом прогривається гранула, тобто температура на поверхні постійна й дорівнює 130 °С. Однак характер кривої розподілу температур F , отриманої в даному програмному комплексі, не відповідає практичним даним (рис.4.25) і результатам розрахунку на наведеній вище моделі (рис.4.25) і може служити лише для наочної ілюстрації динаміки прогріву сфери. Для практичних розрахунків варто використати рівняння розглянутої в роботі моделі.

Як приклад, на рис. 4.25 наведені криві, які базуються на розрахунках, що показують зміну температур у центрі гранули аміачної селітри із часом. Крива x_0 відповідає режиму нагрівання суцільного сухого твердого тіла без урахування тепла модифікаційних перетворень. Криві $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ характеризують зміну температури з урахуванням кількості вологи в гранулі відповідно 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5%, 3,0% і врахуванням тепла модифікаційних перетворень аміачної селітри в межах робочих температур.

Крива F на рис. 4.25 показує залежність зміни температури в центрі гранули від часу згідно з режимом нагрівання суцільного сухого твердого тіла без урахування тепла модифікаційних перетворень.

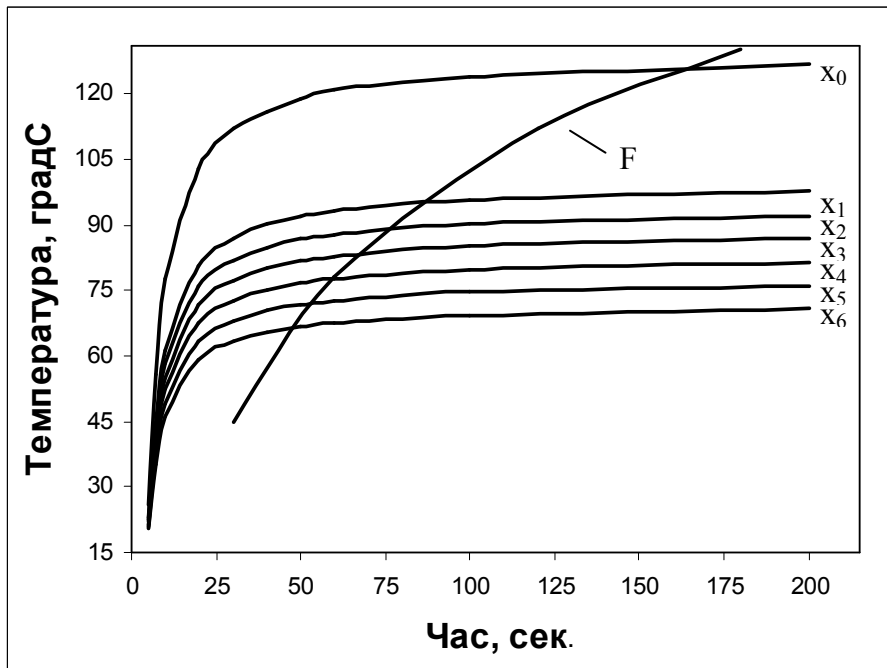


Рис.4.25 – Залежність зміни температури від часу.

Таким чином, аналіз проведених експериментальних досліджень та одержаних залежностей показує, що, знаючи початковий вологовміст гранули та температурний режим, при якому відбувається видалення вологи із гранули, можна визначити час перебування у зоні сушіння з метою видалення певної кількості вологи із гранули й забезпечення заданої пористої структури гранули. Крім цього експериментальні дані показують (рис.4.25), що якщо час

перебування наближається до певної межі, то інтенсивність сушіння починає зменшуватись, на що вказує пологий характер кривих сушіння. Тому даний комплекс досліджень дозволив отримати результати, на основі яких можна визначити оптимальний час сушіння, що дає можливість заощадити значну кількість енерговитрат на сушіння.

4.8 Співставлення результатів експерименту з теоретичними дослідженнями

Для перевірки справедливості теоретичних досліджень необхідно провести їхній порівняльний аналіз із результатами експериментальних досліджень.

Використовуючи отриману у третьому розділі залежність (3.6), яка описує розподіл концентрацій вологи усередині гранули, були отримані результати, надані на рис. 3.7. Порівнявши їх з результатами експерименту, в якому проводилося дослідження впливу початкового вологовмісту гранул, а так само температури у зоні сушіння на час, необхідний для повного видалення вологи із гранул у псевдозрідженому шарі, одержимо погрішність 4,5%.

Розв'язавши рівняння (3.6) відносно τ , були отримані результати, наведені в таблиці 4.13 та на рис. 4.26.

Таблиця 4.13 – Зіставлення результатів

Час сушіння визначений експериментально, сек.	Початковий вологовміст, % мас.	Час сушіння визначений теоретично, сек.	Погрішність, %
180	1	192	6,25
191	2	200	4,5
215	3	227	5,3

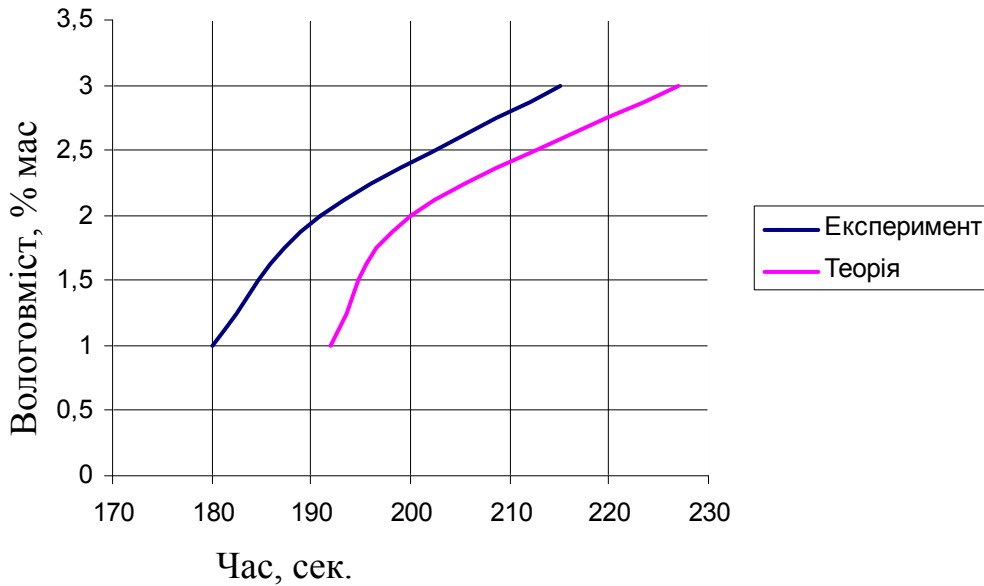


Рис.4.26 – Зіставлення результатів.

4.9 Висновки до четвертого розділу

У результаті проведених досліджень у статичних умовах були отримані залежності початкових вологовмістів гранул аміачної селітри від часу сушіння, отримані значення коефіцієнтів сушіння, визначені швидкості сушіння. У ході експерименту були отримані пористі гранули, які досліджувалися на міцність, всмоктуючу здатність і пористість. Ці показники відповідають ТУ 635-00209023 99. Початкові й отримані гранули так само досліджувалися під мікроскопом і було встановлено, що отримані гранули мають яскраво виражену пористу структуру, чого не можна спостерігати у початкових гранулах.

У результаті досліджень, проведених в умовах псевдозрідженого шарі, отримані значення часу сушіння при різних початкових вологовмістах, температурах і витратах теплоносія. Отримані пористі гранули аміачної селітри досліджувалися на міцність, всмоктуючу здатність і пористість та відповідають ТУ 635-00209023-99.

Проаналізувавши отримані дані та зіставивши їх з теоретичними, можна зробити наступні висновки. При початковому вологовмісті гранули 1 %,

пористість збільшувалась з 10 % початкових до 16 відсотків, відповідно при початковому вологовмісті 2 % збільшувалась до майже 18 %, і при 3 % до 20 %. Припущення $\varepsilon \approx U_0$ не зовсім виправдовується, але тому що пористість збільшується лінійно відносно початкового вологовмісту (для цих умов експерименту) дає можливість у початкові умови розрахунку внести поправку для значення потрібної пористості.

Отримані експериментальні дані підтверджують правильність вибраної теоретичної моделі розрахунку порозності гранули (змінюючи вологовміст матеріалу гранули, можна змінювати її порозність), час перебування гранули в гарячому потоці газу.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ВИХРОВОГО ГРАНУЛЯТОРА

5.1 Опис принципу роботи і пристрою вихрового гранулятора

Отримані результати дозволили розробити новий спосіб виробництва ПАС і ряд конструкцій вихрового гранулятора [8, 9], що дає можливість не тільки одержувати гранули заданої структури, але й проводити класифікацію гранул за розміром.

В основу гранулятора покладений спосіб гранулювання з розплавів, розчинів і суспензій, заснований на вдосконаленні динаміки руху потоку гранул, що забезпечує збільшення монодисперсності гранул, які ростуть у вихровому потоці, і однорідності гранулометричного складу готового продукту, а також за рахунок турбулізації потоку стає більш інтенсивним процес видалення вологи з гранул.

Процес одержання гранульованої аміачної селітри в апараті вихрового типу є ендотермічним і відбувається при нанесенні на тверді частки (ретур) краплі плаву з одночасною їхньою кристалізацією, формуванням їх форми й розміру.

Спосіб гранулювання розплавів, розчинів і суспензій, який включає розпилення рідкого матеріалу в робочому об'ємі додаткового конуса, розташованого усередині вертикального конічного корпусу, у зустрічному вихровому потоці теплоносія, його охолодження й кристалізацію, класифікацію кристалізованих гранул, у цьому ж об'ємі осесиметричним вихровим потоком на велику й дрібну фракції з відводом дрібної фракції з нього в кільцевий конічний простір пристрою, створений між бічними поверхнями додаткового конуса й вертикального конічного корпусу пристрою, з наступним підведенням її назад у робочий об'єм для дорощування гранул і відвід великої фракції гранул із пристрою, що відрізняється тим, що підведення дрібної фракції з кільцевого

конічного простору в робочий об'єм додаткового конуса здійснюють унизу центральної частини в осі додаткового конуса.

У виробництві аміачної селітри застосовують плав концентрацією 60 – 92%. Перед подачею в гранулятор проводять очищення плаву від механічних домішок, пропускаючи через фільтр. Фільтрація плаву необхідна для стійкої роботи вібророзпилювача, за допомогою якої здійснюється його розбризкування.

Для розбризкування плаву використовується вібророзпилювач, який забезпечує регульований, монодисперсний склад крапель плаву, що розпорошується.

З вібророзпилювача факел, що складається із крапель плаву, рівномірно розподіляється по шарі гранул, що рухаються. У якості центрів кристалізації застосовують тверді частки стандартної аміачної селітри або дрібні частки аміачної селітри, утворені при роботі в самому грануляторі, так званий ретур. Ретуrom служать гранули розміром 1 – 3 мм. У процесі запилення твердих часток відбувається укрупнення гранул до розмірів 2 – 4 мм. У міру збільшення розміру гранул відбувається зміна їх структури й фізико-механічних властивостей.

Тому що концентрація плаву нижче ніж вимагають умови протікання процесу в автотермічному режимі, необхідний підігрів повітря, що подається в гранулятор.

Охолодження гранульованої аміачної селітри в апараті дозволяє значно знизити температуру продукту перед завантаженням її в тару. При цьому температура гранул наближається до температури повітря, що проходить через шар гранул.

У процесі кристалізації аміачної селітри в робочій частині гранулятора утворюються гранули різних розмірів, які класифікуються за аеро-гравітаційним принципом. Дрібні гранули вертаються в робочу частину в якості

ретура, а частки, що досягли певного розміру й ваги виводяться з апарата через розвантажувальний пристрій.

На рис. 5.1 показана принципова схема вихрового апарата для гранулювання плаву аміачної селітри.

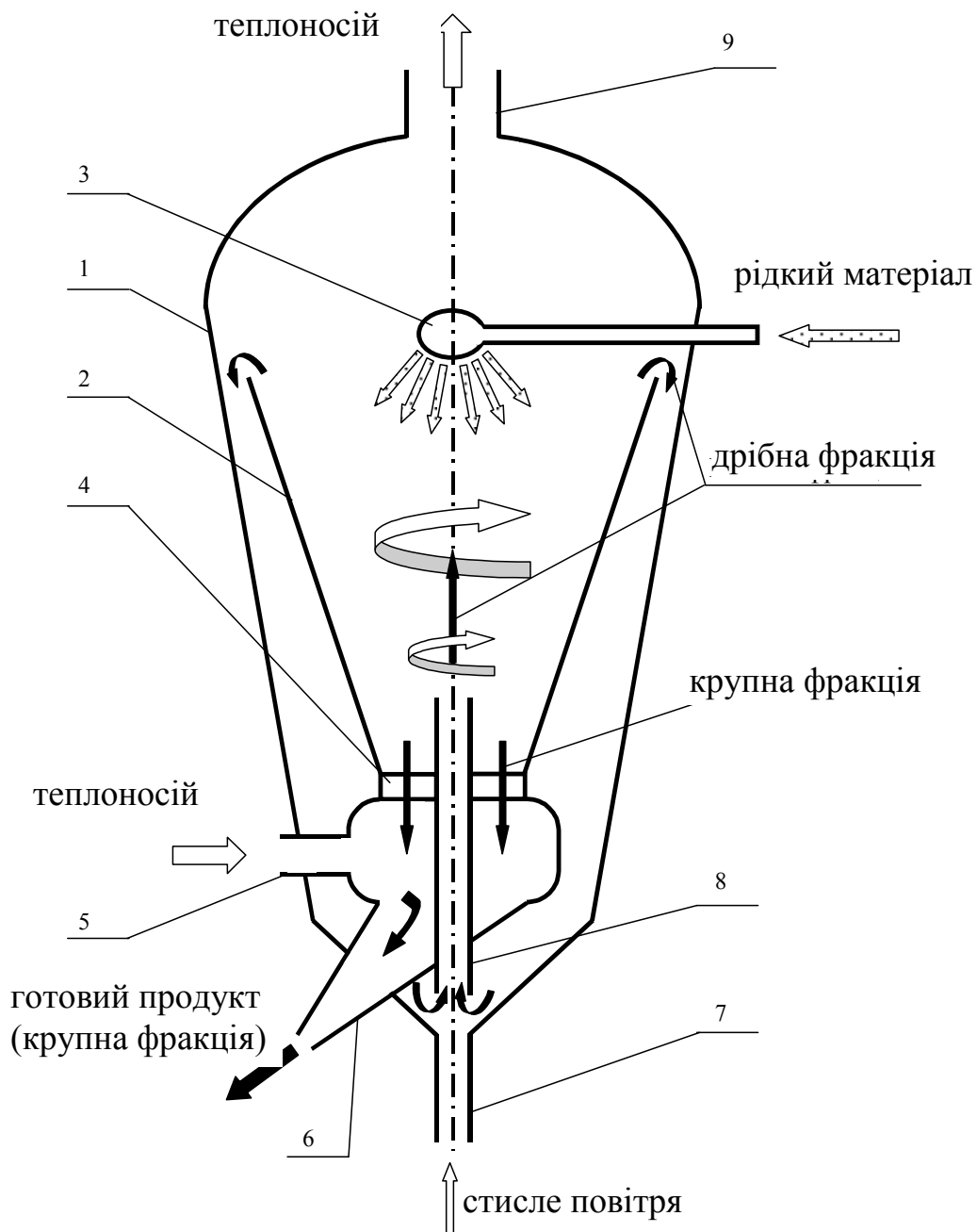


Рис. 5.1. Принципова схема пристрою вихрового гранулятора.

Апарат містить корпус 1, вертикальний конус 2, розпилювач рідкого матеріалу 3, завихрювач 4, пристрій уведення теплоносія 5, патрубок виведення

готового продукту з апарата 6, патрубок уведення стисненого повітря 7, патрубок уведення дрібної фракції в конус 8, патрубок виведення теплоносія 9.

Гранулятор працює таким чином.

В апарат через патрубок 5 підводиться теплоносії, що підводиться до завихрителя 4, при проходженні якого теплоносії закручується навколо вертикальної осі. Вихровий потік теплоносія рухається нагору по конусу. У цей потік через розпилувач 3 уводиться розплав. Краплі розплаву контактують із висхідним потоком теплоносія, охолджуються й кристалізуються. Потім вони потрапляють на внутрішню поверхню конуса. Частки дрібної фракції захоплюються потоком теплоносія нагору, досягають краю конуса й попадають у простір між конусом і корпусом, опускаються вниз. У нижній частині апарата вони потрапляють у зону розрідження, що виникає навколо струменя повітря, що входить через патрубок 7, всмоктуються цим струменем, піднімаються нагору по патрубку 8 і потрапляють у центр нижньої частини конуса. Частки розплаву, потрапляючи на поверхню дрібних гранул, кристалізуються, розмір гранул збільшується. Якщо він досягає певної величини, то гранули опускаються вниз по поверхні конуса.

Теплоносії, звільнений від дрібної фракції, виходить із корпуса через патрубок 9.

Велика фракція виходить через завихрювач і патрубок 6 з апарата.

Аміачна селітра мало чутлива до поштовхів, тертя, ударів, зберігає стійкість при влученні іскор різної інтенсивності. Домішки піску, металу не підвищують чутливості селітри до механічних впливів. Вона здатна вибухати тільки під дією сильного детонатора або при термічному розкладанні.

На цьому грануляторі проводився наробіток пробної партії пористої аміачної селітри. Отриманий продукт відповідав ДСТУ 2-85 а також ТУ 2143-036-00203789-2003 на пористу аміачну селітру.

РОЗДІЛ 6. ВПРОВАДЖЕННЯ ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВОЇ УСТАНОВКИ ОТРИМАННЯ ПОРИСТОЇ АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ

6.1 Інженерна методика розрахунку основних характеристик термо-та гідродинамічних параметрів

Інформація для розрахунку основних геометричних параметрів гранулятора має широкий спектр питань. Необхідно знати вологовміст гранул, гранулометричний склад, теплофізичні властивості фаз і т.п. У загальному випадку інженерна методика розрахунку основних термодинамічних та гідродинамічних параметрів надана на рис. 6.1.

Отримані теоретичні висновки (розділ 3) та результати експериментальних досліджень (розділ 4) у зіставленні їх між собою та результатами ряду літературних джерел (розділ 1) дають можливість створити методику інженерного розрахунку основних термодинамічних й гідродинамічних параметрів, які впливають на створення гранул із заданою структурою, та розрахунку основних технологічних й геометричних параметрів гранулятора.

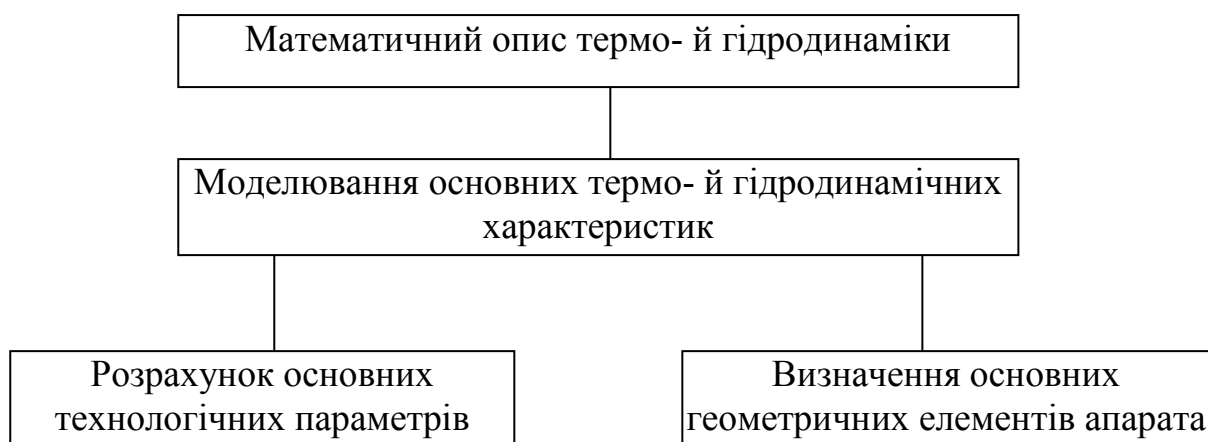


Рис. 6.1 – Основні етапи розробки методики інженерного розрахунку основних термо-й гідродинамічних параметрів.

Основні етапи розрахунку технологічних параметрів вихрового гранулятора та визначення геометричних характеристик зведено до наступного алгоритму:

- завдання початкових умов процесу гранулювання (початковий вологовміст гранул, фізико-хімічні властивості гранул, вибір термодинамічного режиму відповідно до завдання та ін.);
- визначення кількості тепла, що підводиться до однієї гранули;
- визначення загальної кількості гранул, що перебувають у робочій зоні апарата;
- отримання загальної кількості тепла, необхідного для повного видалення вологи з отриманих гранул;
- визначення часу перебування гранул в робочій зоні апарата;
- визначення швидкості газового потоку;
- визначення геометрії псевдозрідженого шару та діапазону його існування;
- отримання основних розмірів робочої камери гранулятора (рис. 6.2.).

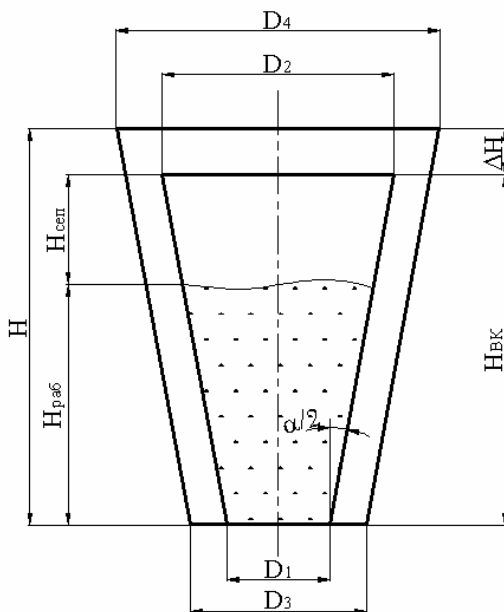


Рис. 6.2 – До визначення основних геометричних елементів гранулятора.

D_1, D_2 – діаметри внутрішнього конусу;

D_3, D_4 – діаметри основного конусу;

α – кут розкриття внутрішнього конусу;

$H_{\text{раб}}$ – робоча висота вихрового шару;

$H_{\text{сеп}}$ – висота сепараційної частини;

$H_{\text{вк}}$ – висота внутрішнього конуса;

H – загальна висота основного конуса.

6.2 Застосування отриманих даних у промисловій практиці

Наукові результати й практичні рекомендації, отримані в даній дисертаційній роботі, використані в ході виконання робіт зі створення й освоєння на РКХЗ “Зоря” дослідно-промислової установки одержання пористої аміачної селітри безбаштовим методом.

За результатами експериментальних досліджень на лабораторній установці, оснащій вихровим гранулятором, була розроблена методика розрахунку технологічних параметрів процесу, що є основою розрахунку основних геометричних розмірів грануляційного обладнання, це дало можливість уперше в Україні приступити до розробки промислового виробництва пористої аміачної селітри.

Розроблена конструкція високоефективного вихрового гранулятора є оригінальним науково-технічним рішенням, що не має аналогів у вітчизняній практиці, а подальше її впровадження дозволило приступити до створення промислових виробництв.

Процес одержання гранульованої аміачної селітри проводиться в апараті комбінованого типу при нанесенні на тверді частки ретур краплі плаву з одночасною їхньою кристалізацією.

У випадку використання як сировини товарної аміачної селітри сільськогосподарського призначення (без поверхневої обробки протизлежучими домішками) або рідкого плаву аміачної селітри – у випадку прив'язки до великотоннажного промислового виробництва, з технологічної схеми виробництва ПАС, можуть бути виключені стадії нейтралізації азотної кислоти й донейтралізації розчину аміачної селітри.

Технологічний процес одержання гранульованої аміачної селітри на пропонуваній установці складається з наступних стадій:

1. Нейтралізація азотної кислоти газоподібним аміаком з одержанням розчину аміачної селітри концентрацією до 92 %.

2. Донеїтралізація розчину селітри, що надходить із нейтралізатора.
3. Дозування розчину аміачної селітри й твердого ретура (або гранул) у гранулятор.
4. Одержання гранул із плаву й ретура в грануляторі.
5. Охолодження готового продукту.
6. Очищення технологічного повітря, що відходить, від домішок.

Принципова технологічна схема стадії гранулювання при використанні як вихідна сировина розчину аміачної селітри наведена на рис.6.3.

60-92%-вий плав аміачної селітри надходить у ємність поз.1 і з неї, через фільтр (на схемі не зазначений) насосом поз.2 подається в гранулятор поз.3 на форсунки, якими розприскується на шар дрібних часток аміачної селітри, що рухаються, (ретура) та надходять із циклона поз.17.

Формування гранул відбувається при кристалізації крапель розплаву на поверхні часток ретура.

Для розбрикування плаву у форсунки може подаватися технологічне повітря компресором поз.6. При подачі концентрованого розплаву повітря повинно бути попередньо нагріто.

Сформовані в апараті гранули виводяться із гранулятора поз.3 в охолоджувач поз.7 і далі на упакування.

Повітряні потоки, що містять частки аміачної селітри розміром менш 1 мм, із гранулятора поз.3, охолоджувача поз.7, подають у промивний скруббер поз.8, зрошуваний циркулюючим розчином, що подається насосом поз.9 з ємності поз.10. Очищене повітря, що містить вологу, після повітрепромивача поз.8 вентилятором поз.11 скидається в атмосферу.

Водяний розчин аміачної селітри із промивного скрубера поз.8 направляють у ємність поз.1. на стандартизацію плаву.

Повітря в гранулятор подається вентилятором поз.14 через теплообмінник поз.15. Повітря в охолоджувач поз.7 подається вентилятором поз.16.

Характеристика сировини, допоміжних матеріалів і кінцевих продуктів
 Специфікація на допоміжні матеріали

- Плав аміачної селітри;
- Вода технологічна
- Повітря
- Пар
- Електроенергія

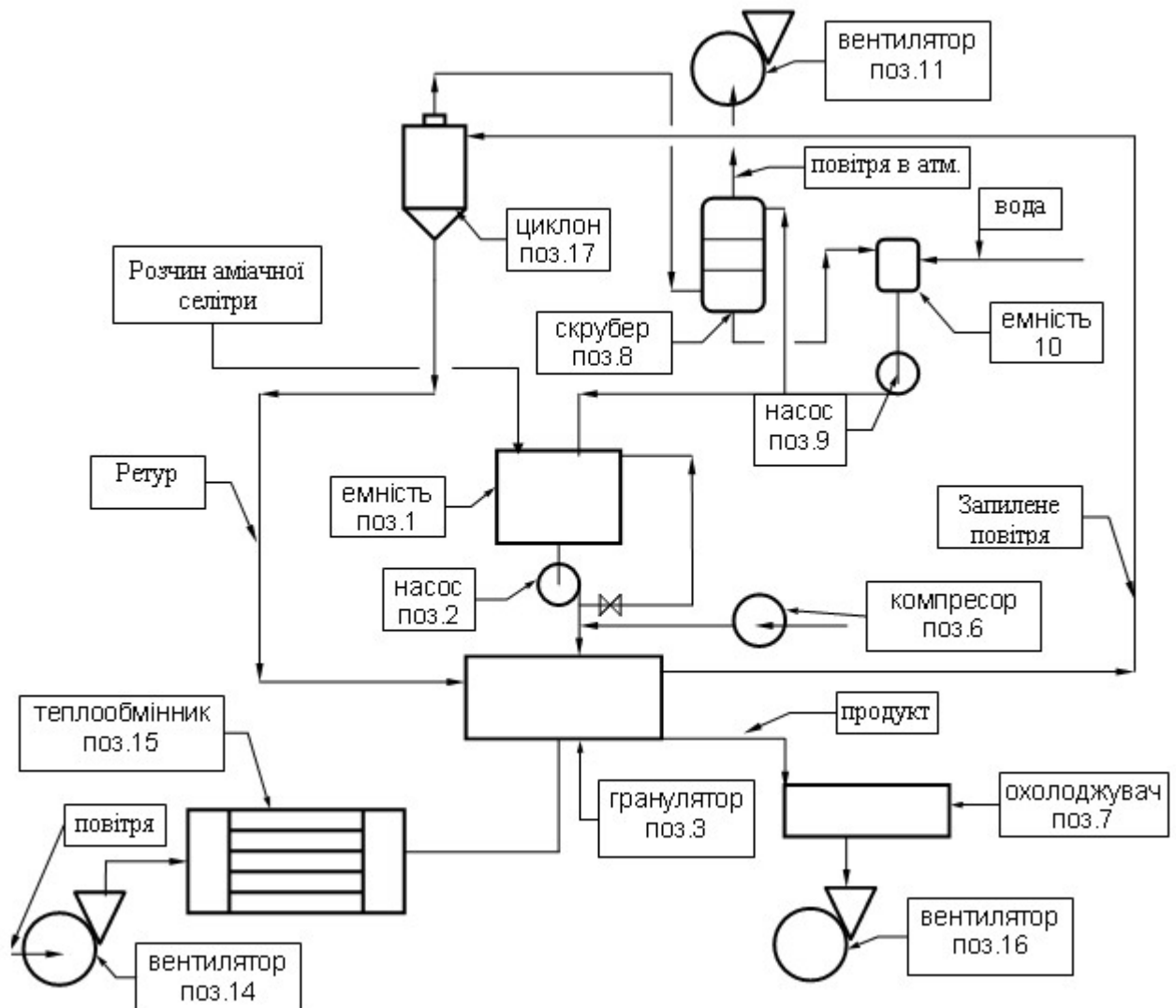


Рис. 6.3 – Принципова технологічна схема стадії гранулювання.

Якість сировини

Плав аміачної селітри, використовуваний для одержання гранульованої аміачної селітри повинен мати концентрацію 60-92 %. Плав аміачної селітри, що надходить на стадію гранулювання, не повинен мати включення з розміром часток більше 0,4 мм і домішок масла.

При використанні в якості ретур дрібної фракції аміачної селітри, що утворилася в грануляторі необхідні продукти які показані в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Споживання продуктів

Сировина	Витрата
Розплав аміачної селітри, кг/г (у перерахуванні на 98 % NH_4NO_3)	1400
Повітря, кг/г	14000
Енергоносії	
- електроенергія, кВт/г	до 175
- пар, ккал/г	до 0,2

Характеристики готового продукту наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Характеристики готового продукту

№ п/п	Найменування показника	Норма	Метод випробування
1	2	3	4
1.	Зовнішній вигляд	Гранульований продукт без видимих на око механічних домішок	
2.	Масова частка нітрату амонію в перерахуванні на суху речовину, %, не менше	98	п.4.4. ДСТУ 2-85
3.	Масова частка вологи, %, не більше	0,6	п.4.6. ДСТУ 2-85

Продовж. табл. 6.2

1	2	3	4
4.	Вбираюча здатність стосовно солярного масла ОСТ 38-157-79, %, не менше	15	
5.	Утримуюча здатність стосовно солярного масла ОСТ 38-157-79, %, не менше	6,5	
6.	Гранулометричний склад: - гранул у межах 1-5 мм, %, не менше у тому числі - гранул 1, 5-5- 3,0 мм, %, не менше - гранул менше 1 мм, %, не більше	90 50 3	
7.	Міцність гранул на роздавлювання г/гранулу, не менше	650	
8.	Розсипчастість, %	100	

Характеристика використовуваної сировини.

Азотна кислота. Концентрація до 60%. Безбарвна або злегка жовтувата, прозора рідина без механічних домішок.

Вміст:

- азотної кислоти 56,0% мас.
- оксидів азоту в перерахуванні на N₂O₄, не більше 0,1% мас.
- хлоридів, не більше 30 мг/л
- прожареного залишку, не більше 0,02% мас.

Аміак. Безбарвний газ із різким запахом. Отримують із рідкого аміаку, що відповідає наступним вимогам:

Вміст:

- аміак, не менше 99,6% мас.
- вода, не більше 0,2 - 0,4% мас.

Вміст домішок:

- масло, не більше 2 мг/кг.

- залізо, не більше	1 мг/кг.
- загальний хлор, не більше	0,5 мг/кг.
- CO ₂ , не більше	30 мг/кг.

Аміачна селітра (нітрат амонію) NH₄NO₃. Має молекулярну масу 80,043; чистий продукт - безбарвна кристалічна речовина, утримуюча 60 % кисню, 5 % водню й 35 % азоту (по 17,5 % в аміачній і нітратній формах). Технічний продукт містить не менше 34,0 % азоту.

Розчин аміачної селітри, використовуваний для одержання гранульованої аміачної селітри повинен мати концентрацію 60-92 %.

Примітки:

1. Розчин аміачної селітри, що надходить на стадію гранулювання, не повинен мати включення з розміром часток більше 0,4 мм і домішок масла.

2. Гранули аміачної селітри, використовувані для виробництва пористої аміачної селітри, не повинні бути оброблені й/або містити у своїй сполуці органічні речовини, застосовувані для запобігання злежуваності гранул.

Відходи виробництва й стічні води.

На установці додаткові стічні води не утворюються. Відходами виробництва є дрібні шматочки аміачної селітри, що утворюються при очищенні апаратів, розсипах, прибиранні приміщень, транспортуванні. Дрібні шматочки подають на розчинення в збірник, звідки розчин повертають у цикл на одержання розчину аміачної селітри.

Газоподібний аміак, що утворився при частковому розкладанні аміачної селітри, поглинають у промивному скрубєрі.

На стадії гранулювання у технологічному процесі одержання гранул аміачної селітри існують дрібні пилоподібні фракції аміачної селітри, які несуться повітрям, з нагнітаючого або відсмоктуючого вентилятора. З метою запобігання потрапляння пилу аміачної селітри в навколишнє середовище здійснюють скрубєрне очищення технологічного повітря, що відходить.

6.3 Оцінка вартості при виробництві пористої аміачної селітри

Питома витрата електроенергії на 1 тонну ПАСЛА – 125 КВт/т. При ціні 1 КВт – 20 коп. вартість електроенергії, що витрачається на 1 т. ПАС складе 25 гр.

Питома витрата гріючої пари на 1 т. ПАС - 0,15 Гкал/т. При ціні 1 Гкал пари – 90 гр. Вартість пари, що витрачається на 1 тонну ПАС складе 13,5 гр.

Заробітна плата основних робітників (4 чіл. x 1500 гр/мес.). З перерахунку на 1 т. ПАС – 6 гр/т.

Разом: основні виробничі витрати складають 44,5 гр/т.

Якщо прийняти, що основні виробничі витрати складають 50% в калькуляції собівартості, то збільшення ціни ПАС по відношенню до гранульованої аміачної селітри сільськогосподарського призначення (при ціні на неї 790 гр/т.) складе: $44,5 \times 2 \times 100 / 790 = 11,3$ гр.

ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу конструкцій грануляторів, грануляційних веж, способів одержання пористих гранул, виявлені недоліки існуючих гранульованих пристроїв і способів грануляції для створення пористої структури у сформованих гранулах, також визначені перспективні напрямки одержання пористої структури в гранулі.

2. Проведено моделювання термо-й гідродинамічних умов створення пористої структури в гранулі, описана і запропонована фізична й математична моделі що показують, як відбувається формування пористої структури. Розроблені фізична й математична моделі дозволяють створити інженерний метод розрахунку технологічного процесу одержання пористої аміачної селітри із сформованої суцільної гранули.

3. Експериментально досліджені процеси видалення вологи із гранули аміачної селітри в статичних і динамічних умовах, отримані термодинамічні й гідродинамічні характеристики процесу на експериментальних стендах.

4. Розроблено методику розрахунку основних характеристик термо-й гідродинамічних режимів.

5. Запропоновано нові способи гранулювання й нові конструкції грануляторів, які захищені деклараційними патентами України.

6. Проведено впровадження нових способів гранулювання в дослідно-промисловій установці одержання пористої аміачної селітри безбаштовим методом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Иванов М.Е. Технология аммиачной селитры / Иванов М.Е., Олевский В.М., Поляков Н.Н. – М.: Химия, 1978. – 311 с.
2. Иванов М.Е. Производство аммиачной селитры в аппаратах большой единичной мощности / Иванов М.Е., Олевский В.М., Поляков Н.Н. – М.: Химия, 1990. — 288 с.
3. Кочетков В.Н. Гранулирование минеральных удобрений / Кочетков В.Н. – М.: Химия, 1975. - 224 с.
4. Москаленко Л.В. Разработка технологии получения термостабильного удобрения на основе аммиачной селитры : автореферат дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.17.01 / Москаленко Л.В. – М., 2007. – 16 с.
5. Митронов А.П. Направление модернизации производственного комплекса азотная кислота – аммиачная селітра / Митронов А.П., Мудрый А.П., Кочергин А.Н., Удовенко А.Г. // Хімічна промисловість України. — 2000. — №1-2.— с. 30 -34.
6. Барбашин А. Состояние рынка аммиачной селитры / Барбашин А. // Евразийский химический рынок. – 2006. №2(14). – с. 26-41.
7. Демидюк Г.П. Взрывчатые вещества простейшего состава (игданиты) / Демидюк Г.П., Росси Б.Д. – М., 1960. – 212 с.
8. Декл. пат. № 69624 UA, МКІ В01 2/16. Спосіб гранулювання рідкого матеріалу і пристрій для його здійснення / Склабінський В.І., Маренок В.М., Кочергін М.О. - № 2003109471; заявл. 21.10.2003 ; надрук. 15.09.2004, Бюл. № 9.
9. Пат. № 2232628 RU, МПК В01J2/16. Способ гранулирования жидкого материала и устройство для его осуществления / Калужников В.В., Склабинский В.И., Кочергин А.Н., Модестов В.Б., Кочергин Н.А., Чернышов А.Н.; заявитель и патентообладатель Общество с

- ограниченной ответственностью Лаборатория РМ НПО СОКБА (RU). - № 2003111844; заявл. 23.04.2003 ; опубл. 20.07.2004, Бюл. № 20.
10. Технологія – 2000 : зб. тез доповідей III Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. — Северодонецьк, 2000 р.
 11. Материалы научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов инженерного факультета. — Сумы: Изд-во СумГУ, 2004. — Вып. 4. — 110 с.
 12. Технологія – 2005 : зб. тез доповідей VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. — Северодонецьк, 2005. — 93с .
 13. Материалы научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов инженерного факультета. — Сумы: Изд-во СумГУ, 2005. — Вып. 7. — 32с .
 14. Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв: наукові праці Одеської державної академії харчових технологій. — Одеса, 2006. — Вип.28. — Т.2— 15 с.
 15. Технологія – 2006 : зб. тез доповідей IX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. — Северодонецьк, 2006. — 44с .
 16. Матеріали III Української науково-технічної конференції “Сучасні проблеми технології неорганічних речовин” Дніпропетровськ, 2006. — 18 с.
 17. Технологія – 2007 : зб. тез доповідей VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. — Северодонецьк, 2007. — 26с .
 18. Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів та студентів інженерного факультету. — Суми: Вид-во СумДУ, 2007. — Вип. 9. — 68с .

19. Кочергін М.О. Виробництво пористої аміачної селітри у вихровому потоці/ Кочергін М.О., Склабінський В.І. // Вісник Сумського державного університету. — 2004. — №13(72). — 899с .
20. Склабінський В.І. Гранульована аміачна селітра. Швидкість видалення вологи / Склабінський В.І., Кочергін М.О. // Хімічна промисловість України. — 2006. — №4(75). — 21-23 с.
21. Склабінський В.І. Вплив температури навколишнього середовища на створення граул пористої структури / Склабінський В.І., Кочергін М.О.// Хімічна промисловість України. — 2007. — №3(80). — 22-24 с.
22. Кочергін М.О. Моделювання процесу видалення вологи із гранули з метою створення пористої структури / Кочергін М.О., Склабінський В.І. // Вісник Сумського державного університету. — 2007. — №3. — 39-44с .
23. FlowVision / ООО ТЕСИС (Современный программный комплекс от компании ТЕСИС моделирует трехмерные стационарные и нестационарные течения жидкости и газа). — М., 2005. — <http://www.flowvision.ru/>.
24. А.с. 1428454 СССР, МКИ В01 2/04. Способ получения гранулированных материалов / Г.Н.Ластовцева, Г.С.Пащенко, Л.Б.Рольщиков — №3879514/31-26; Заявлено 28.03.1985; Оpubл. 07.10.1988, Бюл. №37.
25. А.с. 1613158 СССР, МКИ В01J2/04. Установка получения гранулированных минеральных удобрений / Л.Б.Рольщиков, Г.н.Ластовцева, А.Е.Алексеев, А.В.Марков, М.Г.Листопад, А.Ф.Зарайский. — №4440113/31-26; Заявлено 14.06.1988; Оpubл. 15.12.1990, Бюл. №46.
26. А.с. 1031493 СССР, МКИ В01J2/04. Устройство для гранулирования расплавов / В.Н.Сахаров, И.Н.Барышев, И.А.Егоров. — №3298318/23-26; Заявлено 26.05.1981; Оpubл. 30.07.1983, Бюл. №28.
27. А.с. 1526801 СССР, МКИ В01J2/04. Способ гранулирования расплавов / В.В.Вейлерт, В.В.Сорокин, А.С.Виноградов, П.В.Шалин. — №4048603/31-26; Заявлено 03.03.1986; Оpubл. 07.12.1989, Бюл. №45.

28. А.с. 782855 СССР, МКИ В01J2/04. Способполучения сферических двухслойных гранул / В.М.Олевский, М.Е.Иванов, В.П.Выков, В.М.Линдин, М.К.Рустамбеков, А.Ш.Беркович, Н.Б.Урьев, Е.В.Яновский. — №2655970/23-26; Заявлено 25.02.1975; Оpubл. 30.11.1980, Бюл. №44.
29. А.с. 631191 СССР, МКИ В01J2/04. Грануляционная установка / А.А.Вагин, В.А.Вагин, А.И.Юрченко, А.Д.Гочин, А.В.Киркин. — №2450420/23-26; Заявлено 08.02.1977; Оpubл. 05.11.1978, Бюл. №41.
30. А.с. 1386272 СССР, МКИ В01J2/04. Способ гранулирования расплавов и устройство для его осуществления / В.В.Вейлерт, Ю.А.Калинин, В.В.Сорокин, В.И.Истратов. — №3976837/31-26; Заявлено 16.10.1985; Оpubл. 07.04.1988, Бюл. №13.
31. А.с. 1673198 СССР, МКИ В01J2/04. Установка для гранулирования материалов / Ю.А.Калинин, А.Л.Каплан, В.В.Сорокин, В.С.Соколов, В.Я.Головин, Г.С.Козлов. — №4668272/26; Заявлено 10.02.1989; Оpubл. 30.08.1991, Бюл. №32.
32. А.с. 687652 СССР, МКИ В01J2/04. Способ гранулирования расплава удобрений / В.З.Вильдавский, А.И.Кремер, Я.С.Шенкин. — №1668779/23-26; Заявлено 07.06.1971; Оpubл. 30.06.1986, Бюл. №24.
33. А.с. 889081 СССР, МКИ В01J2/04. Способ гранулирования удобрений/ М.Е.Иванов, А.Ш.Беркович, А.Б.Иванов, В.М.Олевский, М.К.Рустамбеков, В.М.Линдин, Л.М.Хавкин, Б.Н.Малкин. — №2828595/23-26; Заявлено 26.07.1979; Оpubл. 15.12.1981, Бюл. №46.
34. А.с. 1103892 СССР, МКИ В01J2/04. Способ гранулирования расплава и устройство для его осуществления / Б.Г.Холин— №2753304/23-26; Заявлено 17.04.1979; Оpubл. 23.07.1984, Бюл. №27.
35. А.с. 1701361 СССР, МКИ В01J2/04. Устройство для гранулирования расплавов / В.Н.Сахаров, Н.Г.Леваков, А.Н.Селезнев. — №4731000/26; Заявлено 22.08.1989; Оpubл. 30.12.1991, Бюл. №48.

36. А.с. 1613158 СССР, МКИ В01J2/04. Установка получения гранулированных минеральных удобрений / Л.Б.Рольщиков, Г.н.Ластовцева, А.Е.Алексеев, А.В.Марков, М.Г.Листопад, А.Ф.Зарайский. — №4440113/31-26; Заявлено 14.06.1988; Оpubл. 15.12.1990, Бюл. №46.
37. А.с. 1428455 СССР, МКИ В01J2/04. Грануляционная установка / Н.Г.Кононов, В.Н.Кашинский. — №3909913/31-26; Заявлено 11.06.1985; Оpubл. 07.10.1988, Бюл. №37.
38. А.с. 648058 СССР, МКИ В01J2/04. Способ получения гранул из расплавленного материала и устройство для его осуществления / Матис Виллем Пококбир, Кеес Ионккерс. — №2108118/23-26; Заявлено 01.02.1974; Оpubл. 15.02.1979, Бюл. №6.
39. А.с. 1386273 СССР, МКИ В01J2/04. Способ получения гранул из расплавленного материала и устройство для его осуществления / Ю.А.Калинин, В.В.Сорокин, В.И.Истратов, В.В.Вейлерт, А.Л.Каплан. — №4011532/23-26; Заявлено 22.11.1985; Оpubл. 07.04.1988, Бюл. №13.
40. А.с. 1613159 СССР, МКИ В01J2/04. Установка для гранулирования расплавов / В.В.Вейлерт, П.В.Шалин, А.Л.Таран, А.С.Виноградов. — №4488040/31-26; Заявлено 28.09.1988; Оpubл. 15.12.1990, Бюл. №46.
41. А.с. 1526802 СССР, МКИ В01J2/04. Способ получения гранул карбамида / В.В.Вейлерт, В.В.Сорокин, В.Я.Головин, А.С.Виноградов, Ю.А.Калинин — №4249903/31-26; Заявлено 02.04.1987; Оpubл. 07.12.1989, Бюл. №45.
42. Пат. № 9600610 Англии, МКИ В01J2/04. Способ и устройство для формирования частиц / Hanna Mazen, York Peter/ — PST/GB95/01523; Заявлено 30.06.1995; Оpubл. 11.01.1996.
43. Пат. № 9513864 Германии, МКИ В01J2/04. Способ и устройство для распылительной сушки и получения агломерированного порошка /

- Hansen Ove Emill. / / — PST/DK93/00376; Заявлено 17.11.1993; Оpubл. 26.05.1995.
44. Пат. № 551437 США, МКИ В01J2/04. Способ уменьшения эмиссии при гранулировании методом отверждения капель материала, такого как нитрат аммония / Shirley, Jr. Arthur R., Forsythe Phillip A., Giles William M., Phillips John A. — №280245; Заявлено 25.07.1994; Оpubл. 07.05.1996.
 45. Классен П.В. Основы техники гранулирования (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) / Классен П.В, Гришаев И.Г. — М.: Химия, 1982. — 272 с.
 46. Классен П.В. Основные процессы технологии минеральных удобрений / Классен П.В, Гришаев И.Г. — М.: Химия, 1990. — 304 с.
 47. Классен П.В. / Классен П.В, Гришаев И.Г., Шомин И.И. — М.: Химия, 1991. — 240 с.
 48. А.с. №549166 СССР, МКИ В01J2/16. Аппарат для получения гранул в псевдооживленном слое / В.П.Солотовка, А.Ф.Дубовиченко. — №1984892/26; Заявлено 03.01.1974; Оpubл. 05.03.1977, Бюл. №9.
 49. А.с. 1402369 СССР, МКИ В01J2/16. Аппарат с псевдооживленным слоем для сушки и гранулирования материалов / Н.В.Даниленко, В.Л.Коленков, Г.Н.Ластовцева, Л.Б.Рольщиков, Е.В.Фролов, Э.Ф.Шургальский — №3889635/31-26; Заявлено 26.04.1985; Оpubл. 15.06.1988, Бюл. №22.
 50. А.с. 1318281 СССР, МКИ В01J2/16. Способ гранулирования порошков / Н.Г.Вилесов, В.Г.Большунов, В.Д.Романенко, Н.Ю.Евтушенко, В.Г.Василенко, Л.В.Ярусевич — №3933886/31-26; Заявлено 23.07.1985; Оpubл. 23.06.1987, Бюл. №23.
 51. Пат. № 9633009 Испании, МКИ В01J2/16. Способ и устройство для производства гранулятор посредством гранулирования напылением в псевдооживленном слое / Schuette Ruediger, Klasen Claas-Juergen, Bewersdorf Martin, Alt Hans-Christian. — PST/EP96/01453; Заявлено 03.04.1996; Оpubл. 24.10.1996.

52. Пат. № 9614928 Италии, МКИ В01J2/16. Способ и устройство для получения и сушки сферических частиц / Rodrigues Lorenzo, Cini Maurizio. — PST/IT95/00177; Заявлено 06.11.1995; Оpubл. 23.05.1996.
53. Пат. № 9513865 Германии, МКИ В01J2/16. Способ и устройство для получения агломерированного материала / Funder Christian Reedtz, Soerensen Jens Mourits, Hansen Morten Mohr. — PST/DK94/00429; Заявлено 15.11.1994; Оpubл. 26.05.1995.
54. А.с. 1223986 СССР, МКИ В01J2/16. Аппарат для гранулирования материалов в кипящем слое / С.Г.Широкова, Л.Г.Грудзинский, Н.Н.Кретов, Л.Н.Овчинников, В.Н.Кисельников, А.Б.Иванов, М.Б.Иванов — №3512887/23-26; Заявлено 19.11.1982; Оpubл. 15.04.1986, Бюл. №14.
55. А.с. 1315010 СССР, МКИ В01J2/16. Устройство для капсулирования гранулированных и зернистых материалов / Г.А.Минаев, В.Д.Михайлик, С.В.Мищенко — №3931896/31-26; Заявлено 18.06.1985; Оpubл. 07.06.1987, Бюл. №21.
56. А.с. №889082 СССР, МКИ В01J2/16. Установка для гранулирования материалов / Г.И.Ефремов, В.А. Мельник, В.С.Сажин. — №2908068/23-26; Заявлено 31.01.1980; Оpubл. 15.12.1981, Бюл. №46.
57. А.с. №529839 СССР, МКИ В01J2/16. Способ получения гранул из растворов или суспензий / В.Д.Михайлик, Г.А. Минаев, В.С. Никитин, П.В.Классен. — №1816402/26; Заявлено 31.07.1972; Оpubл. 30.09.1976, Бюл. №36.
58. А.с. 1604456 СССР, МКИ В01J2/16. Аппарат для гранулирования материала в псевдооживленном слое/ О.М.Флисюк, И.Г.Лихачев, И.А.Червякова, А.Н.Голиков, Л.В.Кириакиди, Э.У.Жумартбаев, Р.Т.Ким, В.В.Дубовиков — №4344304/31-26; Заявлено 15.12.1987; Оpubл. 07.11.1990, Бюл. №4.
59. А.с. 1321453 СССР, МКИ В01J2/16. Аппарат с псевдооживленным слоем для гранулирования материалов / А.М.Карпов, А.Н.Цетович.

- А.П.Востоков, В.Н.Давыдов, А.И.Попов, В.А.Шиманаев — №3906259/30-26; Заявлено 05.06.1984; Опубл. 07.07.1987, Бюл. №25.
60. А.с. 1313496 СССР, МКИ В01J2/16. Установка для получения гранулированного продукта / Л.А.Горбач, В.С.Молочков, В.Ф.Королёв, М.В.Васькин, А.Н.Цетович, Е.А.Мандрыка, А.П.Востоков, А.Л.Шипулев — №3938663/30-26; Заявлено 06.08.1985; Опубл. 30.05.1987, Бюл. №20.
61. А.с. 1411018 СССР, МКИ В01J2/16. Аппарат для сушки и гранулирования материалов в кипящем слое / А.А.Соколовский, В.А.Будков, В.Д.Пароконный, В.Е.Трубкин, В.П.Павлов, В.Н.Картечин — №3962527/23-26; Заявлено 08.10.1985; Опубл. 23.07.1988, Бюл. №27.
62. А.с. 1554958 СССР, МКИ В01J2/16. Устройство для сушки и гранулирования жидких материалов / Б.С.Сажин, Б.П.Лукаческий, А.А.Полевич, А.В.Акулич, В.З.Павелко— №4167541/31-26; Заявлено 26.12.1986; Опубл. 07.04.1990, Бюл. №13.
63. Пат. № 2060810 РФ, МКИ В01J2/16. Аппарат для получения гранулированных продуктов / О.Р.Иванов, М.И.Снегирев, М.К.Чистяков, В.М.Ражев, В.И.Буданцев— №3657451/26; Заявлено 28.10.1983; Опубл. 27.05.1996, Бюл. №15.
64. Пат. №10288 А Україна, МПК 7 В01J2/16. Спосіб одержання гранульованого продукту / Донат Є.В, Юхименко М.П.. — №93111445; Заявлено 31.03.1993; Надрук. 25.12.1996, Бюл. №4.
65. Юхименко М.П. Апарати завислого шарі. Теоретичні основи і розрахунок / Юхименко М.П., Вакал С.В., Кононенко М.П., Філонов А.П. – Суми: Собор, 2003. – 304 с.
66. Патент №82754 Україна МПК (2006) В01J2/16. Спосіб гранулювання рідкого матеріалу та пристрій для його здійснення / Артюхов А.Є., Склабінський В.І. - №a200608137; Заявлено 20.07.2006; Надрук 12.05.2008, Бюл. №9, 2008р.

67. Патент №29950 Україна МПК (2006) B01J2/16. Пристрій для гранулювання рідкого матеріалу / Артюхов А.Є., Склабінський В.І., Стеценко А.С. - №u200512066; Заявлено 15.12.2005; Надрук 11.02.2008, Бюл. №3, 2008р.
68. Декл. пат. №39024 А Україна МПК 7 B01J2/16. Спосіб гранулювання розплавів, розчинів і суспензій і пристрій для його здійснення / Парьохін О.В., Склабінський В.І. – №2001010023; Заявлено 03.01.2001; Надрук. 15.05.2001, Бюл. №4, 2001 р.
69. Декл. пат. №46560 А Україна МПК 7 B01J2/16. Спосіб гранулювання розплавів, розчинів і суспензій і пристрій для його здійснення / Парьохін О.В., Склабінський В.І. – №2001085767; Заявлено 14.08.2001; Надрук. 15.05.2002 Бюл. №5, 2002 р.
70. Холин Б.Г. Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылители жидкости / Холин Б.Г. – М.: Машиностроение, 1977. – 182 с.
71. Лыков А.В. Теория сушки / Лыков А.В. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1950. - 416 с.
72. Справочник азотчика / под общ. ред. Е.Я. Мельникова. – 2-е изд. перераб. – М.: Химия, 1987. – 461с.
73. Мухленов И.П. Расчеты аппаратов кипящего слоя / Мухленов И.П. – Л.: Химия, 1986. – 167с.
74. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике / Выгодский М.Я. – Изд «наука», М., 1069. 872 с.
75. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Лойцянский Л.Г. – М.: Наука. - 1978. – 736 с.
76. Кочергін М.О. Моделювання процесу видалення вологи із гранули з метою створення пористої структури / Кочергін М.О., Склабінський В.І. // Вісник Сумського державного університету. — 2007. — №3. — с. 39-44.
77. Ормонт Б. Ф. Структуры неорганических веществ / Ормонт Б. Ф. М. — Л., Изд. техн. теорет. литературы, 1950, с. 764—766.

78. Nagatani M. Kogyo Kagaku Zassi / Nagatani M. 1967, v. 70, № 10, p. 1633—1637.
79. Rossini F. D. Selected values of chemical thermodynamic properties / Rossini F. D. NBS, Circ. N 500, U. S. Government printing office, Washington, 1952, p. 564.
80. Бриджмен П. Ф. Физика высоких давлений / Бриджмен П. Ф. М., — Л., ОНТИ, 1935. 402 с.
81. Казакова Е.А. Гранулирование и охлаждение азотсодержащих удобрений / Казакова Е.А. — М.: Химия, 1980. — 288 с.
82. Пестов Н. Е. Физико-химические свойства зернистых и порошкообразных химических продуктов / Пестов Н. Е. — М. — Л., изд. АН СССР, 1947. 234 с.
83. Maplesoft Maple / A division of Waterloo Maple Inc. — 2003. - <http://www.maplesoft.com/main.shtml>; <http://www.mapleapps.com/>.
84. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / Повх И.Л. — Л.: Машиностроение, 1974. — 480 с.
85. Повх И.Л. Техническая гидромеханика / Повх И.Л. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Машиностроение, 1976. — 504 с.
86. Батунер Л.М. Математические методы в химической технике / Батунер Л.М., Позин М.Е. — Л.: Химия, 1971. — 824с.
87. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Шенк Х. — М.: Мир, 1972. — 381 с.
88. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке / Джонсон Н., Лион Ф. — М.: Мир, 1972. — 516 с.
89. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / Винарский М.С, Лурье М.В. — М.: Техніка, 1975. — 168 с.
90. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: издательство “Высшая школа”, 1967. — 599 с.
91. Лыков А.В. Теория сушки / Лыков А.В. — М.: “Энергия”, 1968. — 472 с.

ДОДАТОК А

«СОБЛАСОВАННО»
 Проректор
 по научным вопросам

 « » _____ 2006 г.
 Н.А. Хворост



«УТВЕРЖДАЮ»
 Главный инженер Рубежанского
 казенного химического завода
 «Заря»

 « » _____ 2006 г.
 А.А. Брин



АКТ

о использовании материалов диссертационной работы, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук Н.А.Кочергина.

Данным актом подтверждаем то, что научные результаты и практические рекомендации, полученные в диссертационной работе Н.А.Кочергина «Гидро и термодинамические условия формирования пористой структуры гранул аммиачной селитры» использованы в ходе выполнения работ по созданию и освоению на РКХЗ «Заря» опытно-промышленной установки получения пористой аммиачной селитры безбашенным методом.

Данные материалы переданы в рамках хозяйственных работ между кафедрой «Процессы и оборудование химических и нефтеперерабатывающих производств (ПОХНП)» Сумского государственного университета, ООО «СП Проектсистемсервис» и РКХЗ «Заря».

По результатам экспериментальных исследований на лабораторной установке, оснащенной вихревым гранулятором, была разработана методика расчета технологических параметров процесса, который служит основой расчета основных геометрических размеров грануляционного оборудования, это дало возможность впервые в Украине приступить к разработке промышленного производства пористой аммиачной селитры.

Соискатель принимал участие на всех стадиях научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, по разработке методики расчета и промышленному освоению установки. Разработанная автором конструкция высокоэффективного вихревого гранулятора является оригинальным научно-техническим решением, не имеющим аналогов в отечественной практике, а последующее ее внедрение позволило приступить к созданию промышленных производств.

Начальник
 научно-исследовательского сектора
 СумДУ

 « » _____ 2006 г.
 В.А. Осипов

Зам. директора по науке и развитию
 Рубежанского казенного
 химического завода «Заря»

 « » _____ 2006 г.
 А.Н. Чернышов

Заведующий кафедрой ПОХНП

 « » _____ 2006 г.
 В.И. Склабинский

ДОДАТОК Б

МІНІСТЕРСТВО ПРОМИСЛОВОЇ
ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ

Рубіжнлянський казенний
хімічний завод "ЗОРЯ"

вул. Заводська, 1
м.Рубіжне Луганської області 93001
Телеграфний Восход
телетайп, телекс
118732 VOSHOD UX
факс /064-53/ 7-42-81, 7-12-44
e-mail zarja@zarja.com.ua
Код ЄДРПОУ 14308351
Р/р 26006004540001 в
СФ АКІБ "УкрСиббанк"
м.Северодонецьк МФО 304568



Certified ISO 9001 by



МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОЙ
ПОЛИТИКИ УКРАИНЫ

Рубежанский казенный
химический завод "ЗАРЯ"

ул. Заводская, 1
г.Рубежное Луганской области 93001
Телеграфный Восход
телетайп, телекс
118732 VOSHOD UX
факс /064-53/ 7-42-81, 7-12-44
e-mail zarja@zarja.com.ua
Код 14308351
Р/р 26006004540001 в
СФ АКІБ "УкрСиббанк"
г.Северодонецк МФО 304568

05.05.2006, № 13-3972
на № 12.04.06/1307
от 27.04.2006г.

009104

Проректору по научной работе
Сумского Государственного
университета
Хворосту В.М.
ул.Римского-Корсакова, 2
г.Сумы, 40007

**О целесообразности создания
производства аммиачной селитры
на Украине**

По вопросу отработки технологии и оборудования для получения пористой аммиачной селитры (ПАС) безбашенным способом можем сообщить следующее: сегодня в Украине нет производства ПАС, хотя она является необходимым компонентом простейших промышленных взрывчатых веществ (ПВВ), которые широко внедряются в практику взрывных работ взамен более опасных и дорогих тротилсодержащих ПВВ. Пока в Украине используют рядовую аммиачную селитру (а.с.), менее эффективную, но более дешевую. Рядовая а.с., используемая для удобрений, будет известковаться для снижения содержания азота и уменьшения взрывчатых свойств, согласно директиве Совета Европы. Во всем мире для простейших ПВВ используется только пористая а.с., выпуск которой составляет более миллиона тонн в года.

В настоящее время в Украине и странах бывшего СССР активно внедряются эмульсионные ПВВ – новый класс водоустойчивых ПВВ, которые в США и других странах используются уже более 30-ти лет. В состав этих ПВВ также вводится до 40 % омасленной пористой а.с.. Это так называемые «тяжелые АНФО».

Учитывая изложенное, следует считать организацию производства ПАС в Украине вполне актуальной задачей, и в этом свете вполне целесообразно отработать эффективную технологию и оборудование для ее получения. Определяющими показателями для успеха на рынке будут качество и стоимость полученной ПАС.

С уважением
Главный инженер

А.И.Чернецов

Ерин А.А.,
9-50-21