

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

На правах рукопису

АРТЮХОВ АРТЕМ ЄВГЕНОВИЧ

УДК 66.099.2:936.43.001

**ГІДРОДИНАМІЧНІ ЧИННИКИ ГРАНУЛЯЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ ІЗ
ЗНИЖЕНОЮ ВИСОТОЮ ПОЛЬОТУ ГРАНУЛ**

Спеціальність 05.17.08 — процеси та обладнання хімічної технології

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
доктор технічних наук, професор
Склябінський Всеволод Іванович

Суми – 2009

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ..	14
1.1. Основні конструкції грануляційних веж, напрями їх вдосконалення та організація руху гранул у грануляційних вежах	14
1.2. Математичний опис процесу гранулювання в грануляційних вежах. .	20
1.3. Рух гранул під час вільного падіння	25
1.4. Механізм гранулоутворення у «киплячому» шарі	29
1.4.1. Загальні положення	29
1.4.2. Кінетика росту та руху гранул у псевдозрідженому шарі	30
1.4.3. Апаратурне оформлення процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі	37
1.5. Висновки до першого розділу, постановка задачі досліджень	44
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	47
2.1. Загальна методика проведення досліджень	47
2.2. Методи і засоби математичного моделювання	48
2.3. Будова експериментальної установки	48
2.4. Методика проведення експериментальних досліджень	54
2.4.1. Контроль та вимірювання технологічних параметрів процесу	54
2.4.2. Контроль та вимірювання гідродинамічних характеристик у ході проведення експерименту	55
2.4.3. Візуалізація потоків у вихровому грануляторі	60
2.5. Методика обробки результатів експериментальних досліджень. Оцінка впливу похибок замірів на результати досліджень	60
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНИЙ ОПИС РОБОТИ ГРАНУЛЯЦІЙНИХ	

ПРИСТРОЇВ ІЗ ЗНИЖЕНОЮ ВИСОТОЮ ЗОНИ ГРАНУЛОУТВОРЕННЯ	63
3.1. Вибір шляхів інтенсифікації гідродинамічних показників роботи мало-габаритних апаратів	63
3.2. Розроблення фізичної моделі руху гранул	70
3.3. Математичний опис гідродинаміки закручених потоків у робочому просторі вихрового гранулятора	72
3.3.1. Опис руху газового потоку у вихровому грануляторі	72
3.3.2. Опис руху крапель та гранул	82
3.4. Комплексний розрахунок гідродинамічних параметрів робочого простору вихрового гранулятора	91
3.5. Моделювання газових потоків за допомогою програмних продуктів COSMOS FlowWorks 2006 Pre-Release та FlowVision 2003 demo	92
3.6. Висновки до третього розділу	95
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ГРАНУЛЯТОРІВ ЗІ ЗНИЖЕНОЮ ВИСОТОЮ ПОЛЬОТУ ГРАНУЛ	96
4.1. Мета і задачі експериментальних досліджень	96
4.2. Організація початкового руху газового потоку та його вплив на рух гранул в апаратах зі зниженою висотою польоту гранул	97
4.3. Дослідження впливу гідродинамічних чинників на роботу гранулятора	107
4.4. Висновки до четвертого розділу	111
РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	113
5.1. Аналіз впливу гідродинамічних характеристик газового потоку на рух гранул у вихровому грануляторі	113
5.2. Аналіз результатів теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень руху гранул у робочому просторі вихрового гранулятора	120
5.3. Зіставлення результатів експерименту та моделювання гідродинаміки газового потоку за допомогою сучасних програмних продуктів	126
5.4. Інженерна методика розрахунку грануляторів вихрового типу	129

5.5. Застосування розробленої методики у промисловості	131
5.5.1. Опис дослідно-промислової установки	131
5.5.2. Результати дослідно-промислових випробувань	135
5.6 Висновки до п'ятого розділу	139
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	141
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	142
ДОДАТКИ	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

$Ar = \frac{d^3(\rho_u - \rho_c)\rho_c g}{\mu_c^2}$	- критерій Архімеда;
c	- теплоємність, кДж/кг;
D, d	- діаметр гранули, м;
F_r, F_φ, F_z	- масові сили в радіальному, коловому та осьовому напрямках, Н;
f_β	- сила теплової конвекції, Н;
f_ζ	- сила дії повітря на гранулу, Н;
$f(z)$	- функція, що визначає межу факела зрошення;
G	- масова витрата, кг/с;
g	- прискорення вільного падіння, м/с ² ;
$H_{\text{пад}}$	- висота падіння гранули, м;
L	- теплота кристалізації (модифікаційних перетворень), кДж/кг;
m	- маса, кг;
N	- кількість гранул, що проходять крізь одиницю перерізу за одиницю часу;
$Nu = \beta l / D$	- критерій Нуссельта;
$Pr = \mu / \rho D$	- критерій Прандтля;
Q	- об'ємна витрата, м ³ /с;
R	- радіус краплі (гранули), м;
r	- поточний радіус, м;
r_ϕ	- теплота фазового переходу, кДж/кг;
$Re = (wl\rho) / \mu$	- критерій Рейнольдса;
S	- площа поперечного перерізу, м ² ;
t, Θ	- температура, °С;
u	- витратна швидкість руху суцільної фази в грануляційній вежі, м/с;

V_r, V_z, V_φ	- радіальна, витратна та колова складові швидкості руху газу, м/с;
W_r, W_z, W_φ	- радіальна, витратна та колова складові швидкості руху гранули, м/с;
W	- вологість, %;
x, y, z	- напрямок (декартові координати);
z, φ , r	- напрямок (циліндричні координати);
α	- коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м ² ·К;
α_k	- половина кута розкриття дифузора, град;
β	- коефіцієнт об'ємного розширення; К ⁻¹
γ	- питома вага, Н/м ³ ;
λ	- коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К;
μ	- динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с;
ν	- кінематичний коефіцієнт в'язкості, м ² ·с;
ρ	- густина, кг/м ³ ;
σ	- поверхневий натяг розплаву, Н/м;
τ	- час, с;
ω	- кутова швидкість, с ⁻¹ .

Скорочення

к	- кристалічний
кр	- фронт кристалізації
м	- матеріал
нест	- нестационарний
п	- пульпа
р	- ізобарний
ср	- середній
т	- твердий
ч	- частинка
ш	- шар
г	- газ

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальною проблемою сьогодення є перехід до високоефективних технологій з мінімальним використанням вичерпних енергоносіїв. Використання сучасних досягнень науки і техніки повинно збільшити кількість нових та модернізованих виробництв, що діють за принципом енергоощадності та раціонального використання природних ресурсів.

На сьогодні проблемам підвищення ефективності технологічних процесів, обладнання та якості продукції приділяється велика увага. Стосовно галузей виробництва, що пов'язані з отриманням гранульованих продуктів, ці вимоги відображаються в можливості здійснення процесів в універсальних багатофункціональних апаратах великої питомої потужності.

Будівництво нових хімічних підприємств повинне відповідати світовим стандартам, а також враховувати сучасні запити і вимоги замовників до якості продукції, що випускається. Перехід до нової організації процесу грануляції з використанням малогабаритного обладнання, яке дозволить скоротити витрати енергії, природних ресурсів та трудомісткість, зменшити матеріаломісткість і капітальні витрати на будівництво і забезпечить сприятливу екологічну обстановку в навколишньому середовищі, – перспективний напрям розвитку хімічної промисловості в даній галузі.

Враховуючи значний вплив технологічних параметрів роботи грануляційного обладнання та його конструктивного оформлення на його габарити, останнім часом ведуться пошуки нових високоефективних способів отримання гранульованої продукції. Практична реалізація перелічених заходів пов'язана з розробленням універсальної апаратури, що відповідає вищезазначеним вимогам.

Питання переходу галузі одержання гранульованих продуктів на принципово новий виток розвитку повинно бути всебічно розглянуте. Сучасне грануляційне обладнання (особливо баштове) застаріло. Воно не відповідає сучас-

ним вимогам щодо економічних показників, витратам на будівництво і обслуговування.

Дослідження, спрямовані на опрацювання високоефективного апаратурного оформлення обладнання для гранулювання, визначення найбільш сприятливої конфігурації та конструктивного оформлення окремих елементів апарата та їх комбінації, комплексне теоретичне й експериментальне вивчення гідродинаміки потоків повинні вирішувати проблему, яка стоїть перед хімічною промисловістю України на сучасному етапі.

Одним із найбільш ефективних методів здійснення процесів тепломасообміну, як відомо, є псевдозрідження. Переваги такої гідродинамічної системи відмічені в монографіях вітчизняних та зарубіжних науковців [57, 59-61]. Тому не випадково цей підхід отримав широкий розвиток у багатьох галузях промисловості.

Визначення закономірностей течії закручених потоків в вісесиметричних каналах, у тому числі стосовно роботи грануляторів зваженого шару, розроблення рекомендацій і методик інженерного розрахунку та проектування апаратів з прогнозованими параметрами, зважаючи на перспективу розвитку малотоннажних і малогабаритних виробництв гранульованих продуктів і впровадження нових способів і обладнання для грануляції, є актуальним науковим та практичним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася згідно з пріоритетним напрямом наукової роботи Сумського державного університету "Дослідження вихрових грануляційних та масотеплообмінних пристроїв"(номер державної реєстрації 0106U013012, термін виконання 2006-2008 рр.).

Наукові розробки впроваджені під час виконання госпдоговірних науково-дослідних робіт за темою № 82.05.09.07/п1 „Відпрацьовування технологічних і конструктивних параметрів вузла створення пористих гранул та видача вихідних даних для проектування установки одержання пористої аміачної селітри, розробка конструкторської документації на установку одер-

жання пористої аміачної селітри (ПАС)” (замовник ЗАТ „Експериментально-промислова технологія вибухових робіт” (ЗАТ „ТЕХНОВИБУХ”)).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є створення науково обґрунтованої методики розрахунку гідродинамічних чинників течій фаз у робочому просторі грануляційного пристрою, що має удосконалену конструкцію для забезпечення зниження висоти грануляційного пристрою, підвищення інтенсивності його функціонування.

Для досягнення поставленої мети необхідно послідовно розв’язати такі завдання:

- проведення теоретичного аналізу гідродинамічних умов руху та утворення гранул в апаратах різних типів;
- розроблення фізичної моделі з подальшим математичним моделюванням гідродинаміки руху одно- та багатофазного потоків для наступного їх теоретичного розрахунку та прогнозування поведінки системи у разі зміни окремих параметрів;
- експериментальне дослідження умов сталого гідродинамічного режиму роботи апарата з перемінним за висотою перетином робочого простору в залежності від комплексу початкових умов, визначення поля швидкостей, а також візуальне спостереження за ходом процесу;
- розроблення інженерної методики конструктивного розрахунку вихрового грануляційного обладнання з видачею рекомендацій щодо оптимізації його роботи;
- дослідно-промислове впровадження розробленого апарата в технологічну лінію одержання гранульованих продуктів.

Об’єктом дослідження є течії одно- та двофазного потоків в апаратах з інтенсивною гідродинамікою та зниженою висотою польоту гранул.

Предмет дослідження – гідродинаміка двофазного потоку в апаратах із зниженою висотою польоту гранул змінного перетину робочого простору.

Методи дослідження. Математичне моделювання здійснювалося на базі класичних положень механіки рідини та газу і технічної гідромеханіки. Фізичний експеримент проведено шляхом експериментальних досліджень стендових зразків грануляційного обладнання на базі використання математичного

апарата планування експерименту та математичної статистики. На етапі зіставлення результатів теоретичних та експериментальних досліджень з результатами комп'ютерного моделювання застосовано системи тривимірного твердотілого моделювання КОМПАС-3D (<http://www.ascon.ru/>), програмний комплекс FlowVision (<http://www.flowvision.ru>) та COSMOS FlowWorks 2006 Pre-Release. Побудову теоретичних залежностей виконано диференціальними методами математичного аналізу та інтегрального обчислення.

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів, висновків, положень. Адекватність отриманих розрахункових залежностей для процесу, що досліджувався, обумовлена застосуванням математичних моделей, що базуються на загальних положеннях гідрогазодинаміки, а також зіставленням розрахункових даних з відомими та особисто отриманими результатами експерименту. Достовірність отриманих результатів експерименту обумовлена застосуванням відпрацьованих практикою методів дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів. На базі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень отримані такі наукові результати:

– вперше отримано та проведено узагальнення математичних рівнянь, які дозволяють розраховувати гідродинамічні характеристики руху фаз у робочому просторі апарата зі змінною площею перетину та з використанням пристроїв для завихрення;

– за результатами експериментальних досліджень модельних зразків апаратів для гранулювання, комп'ютерних моделей апаратури даного типу та їх співставлення визначено відмінності в розподілі швидкостей газового потоку в робочому просторі апарата зі змінною площею перетину та наявності обертового руху одно- та двофазного потоків, що досліджено, та вперше отримано гідродинамічні характеристики режимів роботи вихрового гранулятора;

– на основі створеної математичної моделі розроблено методи управління рухом краплі (гранули) у вихровому газовому потоці.

Практичне значення одержаних результатів. На основі теоретичного аналізу створених фізичної і математичної моделей руху однофазного, а потім і

двофазного потоків, проведених досліджень гідродинамічних процесів розроблено методики розрахунку малогабаритних вихрових пристроїв зі змінною площею перетину робочого простору. Створено новий тип організації гідродинамічних умов руху потоків у робочому просторі гранулятора, запропоновано та захищено патентами України нові способи гранулювання та нові конструкції апаратів-грануляторів зі змінною площею перетину робочого простору з удосконаленою гідродинамікою. Отримані наукові результати впроваджені у виробництво гранульованих продуктів з особливими властивостями: розроблено нову технологічну лінію отримання гранул з використанням дослідженого обладнання для подальшого впровадження (ЗАТ „Експериментально-промислова технологія вибухових робіт”), видано рекомендації щодо оптимального комплексу гідродинамічних та технологічних параметрів проведення процесу.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає у: проведенні математичного моделювання гідродинаміки руху фаз у вихровому грануляторі, аналізі класичних рівнянь механіки рідини та газу і технічної гідромеханіки з подальшою адаптацією їх для отримання розрахункових залежностей; підборі та вдосконаленні методик проведення експерименту з визначення гідродинамічних умов формування зваженого шару у вихровому грануляторі; розробленні та конструюванні натурних стендів для проведення експерименту; аналізі результатів та отримання інженерної методики розрахунку малогабаритних апаратів. Постановка задачі та формулювання висновків проводилися під керівництвом наукового керівника д-ра. техн. наук, професора В.І.Склабінського. Здобувач брав участь на всіх стадіях науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт з виготовлення й авторського нагляду за виготовленням та експлуатацією дослідно-промислових зразків грануляційного обладнання як відповідальний виконавець.

Усі результати, що складають основний зміст дисертаційної роботи, обговорювалися на конференціях різного рівня, де здобувач особисто доповідав результати роботи [103-105, 138, 143, 160-164, 168-174, 173, 178-185]. На базі зазначених робіт захищено патентами України [96, 97] нові способи гранулювання та пристрої.

У статтях, які написані особисто та у співавторстві та опубліковані у фа-

хових виданнях, що затверджені ВАК України [98, 102, 112, 159, 165-167, 175, 177], особистий внесок здобувача полягає в наступному:

- у роботі [102] проаналізовано стан проблеми гранулювання, основні переваги малогабаритних апаратів змінного перетину з використанням вихрових потоків у порівнянні з іншими типами обладнання;

- у роботі [98] обґрунтовано методи інтенсифікації процесів гранулювання на прикладі конструктивного оформлення окремих вузлів вихрового гранулятора зваженого шару;

- у роботі [159] розроблено математичну базу та створено алгоритм чисельного розрахунку гідродинамічних параметрів робочого простору вихрового гранулятора зваженого шару;

- у роботі [165] отриманий приблизний аналітичний розв'язок рівняння Нав'є-Стокса з послідуною перевіркою достовірності отриманого результату та визначенням характеру зміни складових повної швидкості в довільній точці робочого простору вихрового гранулятора;

- у роботах [112, 167] розроблено фізичну модель процесів, що властиві грануляторам зваженого шару, та отримано основні результати з визначення полів швидкостей руху фаз у вихрових апаратах;

- у роботі [166] проведено аналіз результатів експерименту та порівняння їх з результатами комп'ютерного моделювання за розробленими стандартними методиками з метою визначення відмінних рис функціонування вихрових апаратів та використання висновків для розроблення поправок та вдосконалень у методикі інженерного розрахунку грануляторів;

- у роботі [175] розглянуто основні етапи розробки методики інженерного розрахунку вихрових апаратів для проведення гранулювання у зваженому шарі;

- у роботі [177] здійснено авторський нагляд за роботою дослідно-промислових зразків, розроблено високоефективну конструкцію гранулятора для промислового впровадження; отримано результати промислового експерименту.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на III Міжнародній науково-

практичній конференції «Екологія. Економіка. Енергозбереження» (м. Суми, 2005 р.), XI та XII Міжнародних наукових конференціях «Удосконалення процесів та обладнання харчових і хімічних виробництв» (м. Одеса, 2006, 2008 рр.), XXII науковій конференції країн СНД „Дисперсные системы” (м. Одеса, 2006 р.), III Українській науково-технічній конференції з технології неорганічних речовин (м. Дніпропетровськ, 2006 р.), Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Аграрний форум» (м. Суми, 2007 р.), II Міжнародній науково-практичній конференції «Дни науки» (м. Дніпропетровськ, 2007 р.), XI науковій конференції «Львівські хімічні читання» (м. Львів, 2007 р.), III Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Хімія та сучасні технології» (м. Дніпропетровськ, 2007 р.), III Міжнародній конференції «Стратегія якості у промисловості і освіті» (м. Варна, Болгарія, 2007 р.), IV Міжнародній науково-практичній конференції «Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні» (м. Львів, 2007 р.), V Всеукраїнській конференції молодих вчених та студентів з актуальних питань хімії (м. Дніпропетровськ, 2007 р.), II Всеукраїнській науково-практичній конференції «Теорія і практика сучасного природознавства» (м. Херсон, 2007 р.), XX Міжнародній науково-технічній конференції «Реактив-2007» (м. Мінськ, Білорусь, 2007 р.), VIII, IX, X, XI Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених „Технологія” (м. Сєвєродонецьк, 2005, 2006, 2007, 2008 рр.), науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів і студентів Сумського державного університету (м. Суми, 2005, 2006, 2007, 2008 рр.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в дев'яти наукових працях у журналах і збірниках, затверджених ВАК України. Отримано патент України на корисну модель та патент України на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 185 найменувань, додатків. Повний обсяг дисертації становить 181 сторінка, серед яких 163 сторінки основного тексту, 5 таблиць, 89 ілюстрацій, з яких 22 розміщено на 5 окремих сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Основні конструкції грануляційних веж, напрями їх вдосконалення та організація руху гранул у грануляційних вежах

Сучасне виробництво гранульованих продуктів потребує створення нових енергозберігаючих та ресурсозберігаючих технологій гранулювання з метою отримання продукції високого гатунку, збільшення питомої потужності виробництва, зменшення габаритів обладнання, підвищення ступеня інтенсифікації теплообмінних та масообмінних механізмів, що становлять сутність процесу гранулоутворення. У зв'язку з цим перед дослідниками та конструкторами постає досить актуальна проблема – розроблення високоефективного грануляційного обладнання, що повинно задовольняти високі умови сучасної економіки, зберегти переваги попередніх розробок та впровадити нові, до цього часу не використані у виробництві прогресивні методи підвищення якості продукції.

На сьогодні вітчизняні підприємства, що спеціалізуються на виробництві гранульованих пористих продуктів з розчинів і розплавів, використовують для цього грануляційні вежі [1]. Цей тип обладнання характеризується значними капітальними витратами на виготовлення, технічне обслуговування і ремонт, пов'язаними з тим, що грануляційні вежі мають великий діаметр і досить велику висоту. Значні габаритні розміри грануляційного обладнання баштового типу обумовлюють також складність виготовлення та експлуатації. Крім того, грануляційні вежі мають порівняно низьку питому продуктивність [2]. Будівництво принципово нових малотоннажних підприємств, що ґрунтуються на виробництві гранульованих продуктів за допомогою грануляторів псевдозрідженого шару, - один зі способів зниження вит-

рат на виробництво гранульованих пористих продуктів і збільшення їх якісних характеристик.

Основні методи гранулювання та місце грануляційних веж і грануляторів псевдозрідженого шару наведено на рис. 1.1.

З метою зниження злежування добрив необхідно зменшувати вміст вологи в розплаві, випускати добрива у вигляді гранул розміром 2-3 мм та охолоджувати їх перед упаковкою [1].

Метод гранулювання шляхом розбризкування плаву у вільний об'єм знайшов широке застосування під час отримання гранул з висококонцентрованих плавів у високих порожніх ємностях (грануляційних вежах) з охолодженням падаючих крапель зустрічним потоком повітря [1, 2] як у вітчизняній практиці (АС-67, АС-72 та ін.) [3, 4] так і у зарубіжних технологіях гранулювання (схеми «Кеміко», «Стамікарбон», «Ай-Сі-Ай», «Штенгель», «Кеміко-Кальтенбах», «Тойо коатцу індастріел», «Норск-Гідро» та ін.) [1, 2].

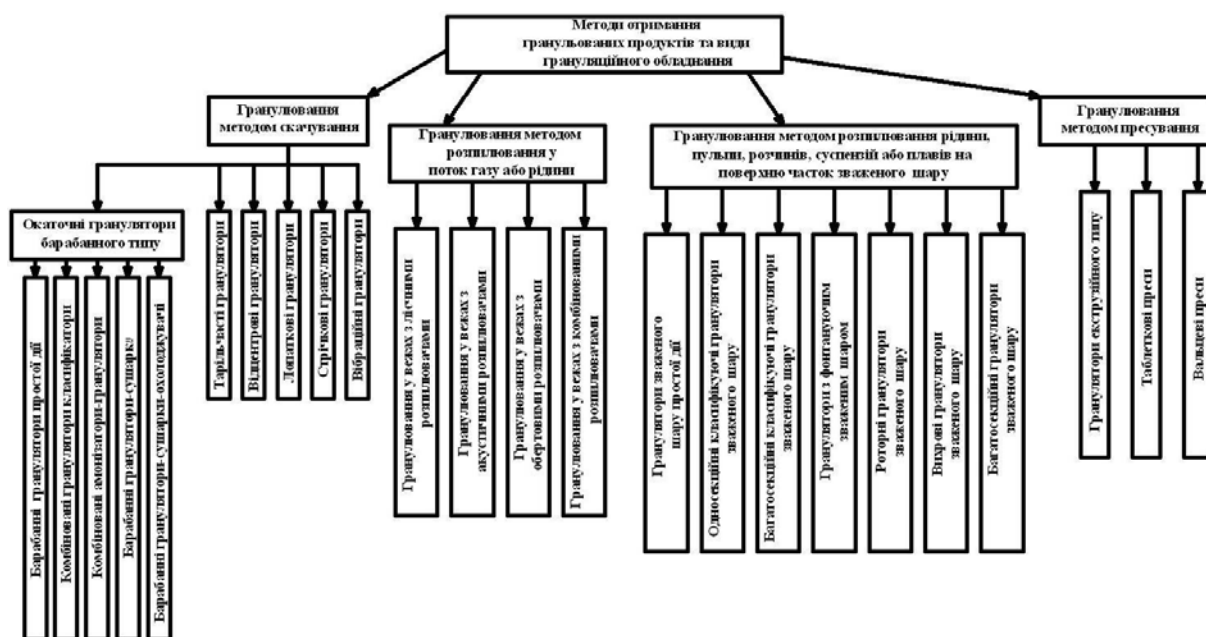


Рис. 1.1. Класифікація способів гранулювання та видів грануляційного обладнання [6-8].

Основні переваги методу баштового гранулювання [1-5]:

- продукт, який отримано у грануляційних вежах, має більш постійний гранулометричний склад;
- велика продуктивність щодо готового продукту.

Аміачну селітру гранулюють у високих (30-60 м) або низьких (приблизно 21м) вежах. Для гранулювання карбаміду застосовують вежі висотою 50 м. Фосфати амонію та складні добрива, які отримують на основі нітрофосфатів та фосфатів амонію, гранулюють у вежах, висота яких сягає 50-66 м.

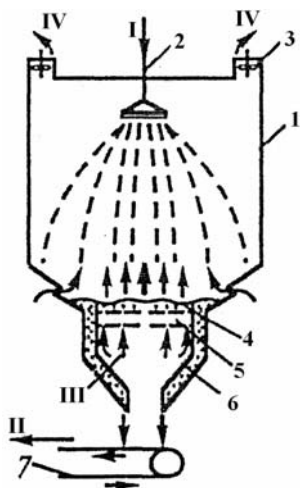


Рис. 1.2. Загальна схема процесу гранулоутворення в грануляційних вежах:

1 - корпус вежі; 2 - гранулятор; 3 - вентилятор для створення потоку холодоагенту (повітря); 4 - псевдозріджений шар гранул; 5 - газорозподільний пристрій; 6 - пристрій для перетікання гранул; 7 - транспортер гранул.

I – розплав; II – гранули; III – вхідне повітря;

IV – відпрацьоване повітря.



Рис. 1.3. Грануляційна вежа Н=77м D=22м Ново-московського ПО "АЗОТ".



Рис. 1.4. Грануляційна вежа Н=107м Березняківського АТЗ.



Рис. 1.5. Грануляційна вежа Н=105м Пермського НПК.

На підставі аналізу патентної документації винаходів країн світу [9-29] сформовано таку класифікацію грануляційних веж за ознаками, що впливають на рух гранул у робочому просторі грануляційних веж та гідродинамічні умови формування руху гранул:

1. За формою корпусу вежі – циліндричні, прямокутного перерізу.
2. За матеріалом – залізобетонні, металеві (кислотостійка сталь, алюміній, сплави алюмінію з марганцем, кремнієм, міддю та хромом).

3. За робочим тиском - під розрідженням, під напором.
4. За типом гранулятора (розпилювача) – відцентровий, статичний, вібраційний, акустичний, форсунка високого тиску, розпилюючі сопла.
5. За кількістю розпилювачів.
6. За характером витікання струменя розплаву – вгору під кутом, вниз під кутом, вертикально вниз, вертикально вгору (на сьогодні не використовується).
7. За характером відведення гранул - збірник гранул у вигляді одного або декількох конусів, зона киплячого шару, радіальний гребок, що обертається (плоске днище).
8. За методом виведення повітря – з центра вежі, з її периферії.
9. За наявністю охолоджувача киплячого шару, що займає частину поперечного перерізу вежі (до 1/10) або весь переріз.
10. За типом процесу гранулювання – ретурний, безретурний.
11. За способом гранулювання – у порожнистій вежі, за наявності пилового потоку.

Якість кінцевого продукту грануляційних веж значною мірою визначається ступенем його монодисперсності [30], від якого залежать:

- можливість транспортування продукту без тари;
- низька здатність до злежування;
- однорідність механічних властивостей та можливість її підвищення;
- можливість інтенсифікації роботи грануляційних веж, підвищення їх ефективності та економічності;
- зменшення віднесення дрібної фази та забруднення атмосфери.

На практиці існують такі варіанти задач, що безпосередньо пов'язані з оптимізацією роботи грануляційних веж та підвищенням їх інтенсивності:

1. Розроблення методів роботи грануляційних веж з метою отримання готового продукту більшого розміру.
2. Підвищення потужності виробництва та зменшення енерговитрат на виробництво.

3. Визначення оптимальних технологічних і конструкційних параметрів грануляційних веж для отримання гранул необхідного розміру.

Питання розрахунку оптимальних конструкцій грануляційних веж та надання рекомендацій щодо методів інтенсифікації їх роботи – актуальне питання, якому присвячені роботи Казакової [1, 2], Олевського та Іванова [3, 4], Асеева [31] та інших науковців. У зазначених роботах оцінено вплив на інтенсивність роботи грануляційних веж таких факторів: висота грануляційної вежі; швидкість технологічного повітря; питома витрата повітря; наявність охолоджувача киплячого шару; вплив температури охолоджуючого повітря на перебіг процесу кристалізації та охолодження; наявність кондиціонера для охолодження повітря перед надходженням до грануляційної вежі; введення модифікаторів у процес гранулювання.

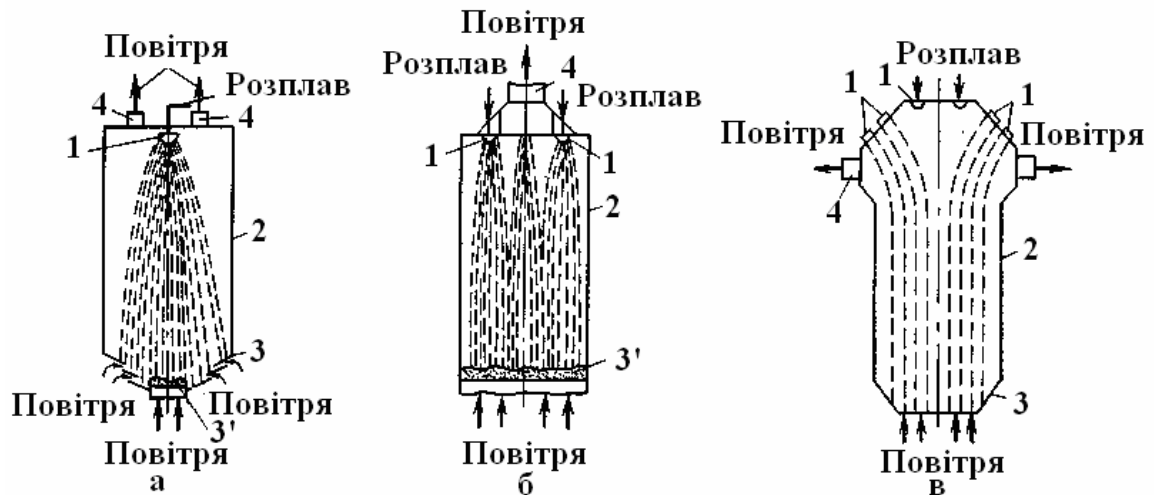


Рис. 1.6. Схема грануляційних веж різних типів: а – залізобетонна циліндрична діаметром 16 м та висотою 30-35 м з конусами та охолоджувачем киплячого шару [1]; б - залізобетонна циліндрична діаметром 12 м та висотою 30 м з охолоджувачем киплячого шару по усьому перерізу, що працює під напором [2]; в – металічна прямокутна з перерізом 11 на 8 м з конусом у нижній частині [1]; 1 – гранулятор; 2 – вежа; 3 – конус; 3' – охолоджувач киплячого шару; 4 – повітровід.

Оскільки швидкість повітря в грануляційній вежі є одним із головних чинників інтенсифікації процесів теплообміну в ній, автори [1] дійшли висновку що зменшення діаметра вежі дозволяє значно підвищити ефективність її ро-

боти. Також був зроблений висновок про доцільність використання вбудованого охолоджувача киплячого шару [2].

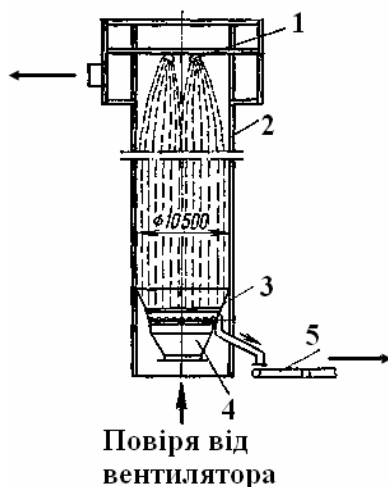


Рис. 1.7. Грануляційна вежа «Тойо Коатцу» [2]:

1 – гранулятор; 2 – корпус; 3 - направляючий конус;
4 – охолоджувач киплячого шару; 5 – транспортер.

Аналіз, проведений у роботах [31, 32], показує, що найвагомішими чинниками, які впливають на інтенсивність процесів теплообміну в грануляційній вежі, є висота вежі та швидкість повітря у вежі. При вирішенні задачі підвищення ефективності роботи веж з метою отримання великих гранул перевага віддається першому чиннику.

У проаналізованих вище роботах не досліджено такі чинники інтенсифікації роботи грануляційних веж, як розміри факела зрошення та інтенсивність процесів теплообміну в грануляційній вежі. В роботах [33, 34] проаналізовано зазначені характеристики. Тому оптимізаційний розрахунок грануляційної вежі доповнюється такими параметрами:

- тип гранулятора (порівняльний аналіз конструкцій грануляторів різних типів з основними перевагами та недоліками наведено, зокрема, в [1, 30]);
- розміри факела зрошення.

Крім того, автори [30] розширили розгляд поняття питомої витрати повітря та ввели замість цього параметра дві окремі характеристики: витрата продукту і витрата повітря. Це обґрунтовано тим, що одна і та сама питома витрата повітря відповідає різним умовам проходження процесів теплообміну в грануляційній вежі при різних витратах продукту.

Згідно з [31] виділено такі фактори, що впливають на роботу розпилювача та інтенсивність руху гранул у грануляційних вежах: швидкість витікання розчину; відстань по вертикалі; кут між віссю та горизонтом; швидкість та частота обертання (для обертових розпилювачів); діаметр отвору витікання; характер регулювання процесу розпаду крапель.

Розрахунки оптимальних параметрів грануляційних веж, що розроблені на основі науково-дослідних робіт [1-5, 31, 32], проаналізовано і доповнено в роботі [30] стосовно до конкретних умов виробництва мінеральних добрив на існуючих вітчизняних та зарубіжних підприємствах.

1.2. Математичний опис процесу гранулювання в грануляційних вежах

У процесах гранулоутворення виявляються майже усі відомі види фізико-механічних та фізико-хімічних зв'язків між частинками матеріалу, що гранулюється [6,7]. З урахуванням цього усі відомі види зв'язків під час гранулювання наведені у загальну класифікаційну схему (рис 1.8).

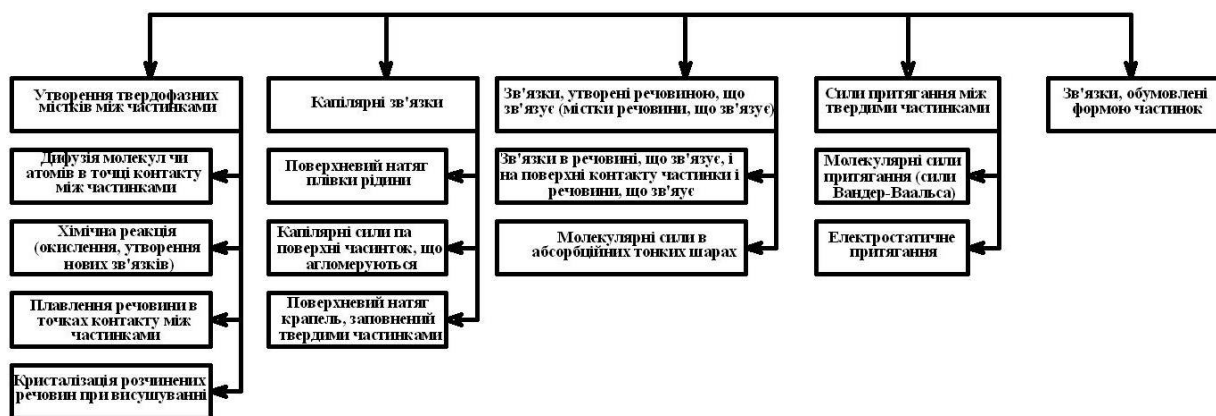


Рис. 1.8. Класифікація зв'язків під час гранулювання.

Опис процесу кристалізації та охолодження гранул у просторі грануляційних веж долучає до свого складу задачі нестационарного теплообміну в гранулах та конвективного теплообміну в межах газової фази [1, 2].

Механізм гранулоутворення [1, 2] полягає у розпаді струменів на краплі, що, охолоджуючись у зустрічному потоці повітря, перетворюються на

гранули. У польоті краплина (гранула) через свою зовнішню поверхню віддає тепло потоку охолоджуючого повітря. При цьому з поверхні починається охолодження та кристалізація плаву з утворенням твердої оболонки, товщина якої у міру польоту краплини (гранули) збільшується. Таким чином, спостерігається рух фронту кристалізації всередину гранули по радіусу з відповідним виділенням тепла кристалізації. При досягненні поверхнею гранули температури модифікаційного переходу фронт цього переходу з відповідним тепловиділенням починає переміщуватися слідом за фронтом кристалізації. Аналогічно проходять і подальші модифікаційні переходи у структурі гранули, які ускладнюють процес нестационарної теплопередачі.

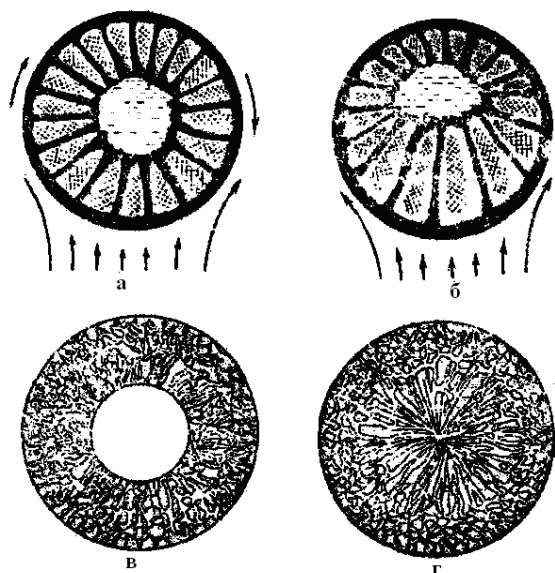


Рис. 1.9. Схема затвердіння гранул під час падіння у потоці висхідного повітря:

а — гранула, що обертається;
 б — гранула, що не обертається;
 в — гранула з внутрішньою порожниною;
 г — гранула нормальної структури.

Будь-яке фазове перетворення відбувається за рахунок утворення та росту центрів «нової» фази [35-39] та супутніх їм явищ перенесення у фазах [3-8]. Кінетика утворення та зростання «нової» фази кількісно оцінюється відповідними швидкостями [37, 38, 40, 41].

Для математичного опису процесу гранулоутворення в грануляційних вежах запропоновано декілька методів підходу.

У роботі Гусєва і співавт. [42] була вирішена зовнішня задача, тобто процес розраховувався згідно з рівнянням конвективного теплообміну

$$Q = 6\alpha G \Delta\theta_{cp} \tau / d_{cp}. \quad (1.1)$$

Використання на практиці цього методу призводить до значних похибок через неврахування внутрішнього теплового опору краплі. Під час вирішення інженерних задач внутрішнім тепловим опором можна знехтувати при $Bi < 0,1$ та $Fo > 10$ [96].

У роботах Стейна [44, 45] опис процесу гранулювання сформульований у рамках задачі Стефана, тобто як задача нестационарної теплопровідності, що проходить в умовах конвективного тепловідведення від поверхні тіла та теплового балансу на поверхні розподілу твердої та рідкої фаз

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \text{grad}^2 \theta \text{ при } r_{kp} < r < R, \quad (1.2)$$

$$-\frac{d\theta}{dr} = \frac{\alpha}{\lambda} (\theta(R) - \theta_c) \text{ при } r = R, \quad (1.3)$$

$$\frac{dr_{kp}}{d\tau} = \frac{\lambda}{\rho L} \frac{\partial \theta}{\partial r} \text{ при } r = r_{kp}. \quad (1.4)$$

Задача була розглянута за умови рівномірного теплообміну на поверхні краплі та припущення, що на фазовій межі процес проходить з постійною температурою і швидкість процесу кристалізації обумовлюється інтенсивністю теплообміну.

Значно ускладнює вирішення задачі умова зміни температури поверхні при теплообміні в охолоджуючому середовищі. У такому випадку в роботі Хубера [46] запропоновано такий спосіб вирішення: тепловіддача від гранули та швидкість її руху прийняті сиалими величинами. Задача була вирішена приблизно з припущенням про лінійний розподіл температур у твердій фазі для випадку шароподібної частки. В роботі Тао [47] отримано систему диференціальних рівнянь, що перетворені в скінченно-різницеві рівняння з використанням модифікованого виразу Бендер-Шмідта. Результати чисельного вирішення візуалізовано у вигляді графічних залежностей.

Розвиток моделі кристалізації в грануляційних вежах [44-47] враховував наявність декількох фазових перетворень, характер зміни теплопровідності рідкої та твердої фаз залежно від температури, закладено можливість розрахунку кристалізації гранул з полідисперсним фракційним складом.

Доповнення системи рівнянь граничною умовою, що враховує утворення усадкової раковини в центрі краплі через різницю густин розплаву та твердої фази, проведено Тараном [48] і Гельперіним [49]. При цьому авторами було припущено, що об'єм краплі не змінюється під час її затвердіння і густина утвореної твердої фази дорівнює густині кристалічної речовини:

$$\frac{\partial \theta(r_y)}{\partial r} = 0, \quad (1.5)$$

$$\text{де } r_y = \sqrt[3]{\left(R^3 - r_{kp}^3\right) \left(\frac{\rho_k}{\rho_p} - 1\right)}. \quad (1.6)$$

Аналіз [1, 2] доводить, що у разі відсутності врахування вищезазначені граничної умови при моделюванні процесу кристалізації час кристалізації збільшується на 30-40%.

Ігнорування умови руху розплаву до фазового фронту під дією стискання кристалічної оболонки в останньому виразі призводить до похибки на рівні 3%, що досить припустимо.

Під час падіння гранул у просторі грануляційної вежі конвективний теплообмін по поверхні краплі має нерівномірний характер. Це призводить до того, що охолодження лобової частини краплі відбувається значно швидше, ніж її кормової частини. Внаслідок цього температурні поля в гранулі відрізняються від полів за умови рівномірного тепловідведення по поверхні краплі. Таран і співавт. [50] розробили опис процесу за умови нерівномірної інтенсивності відведення тепла по поверхні краплі на базі двовимірного рівняння

теплопровідності. В доповнення до цього було вдосконалено процедуру визначення форми та розмірів усадкової раковини на основі умови мінімуму поверхневої енергії. Розроблена модель дозволила розрахувати температурні поля, положення між фазних границь, розміри та форму усадкової порожнини.

У моделях, що розглянуто, не враховано теплообмін повітря по радіусу грануляційної вежі. Бралось припущення про сильне перемішування повітря в радіальному напрямку. в розрахунках використовується середня температура повітря по радіусу грануляційної вежі. В роботах Мещерякова [51] і Бахтіна [52] доведено нерівномірність розподілу гранул по перерізу вежі. Це призводить до відмінності температури повітря у факелі гранул та середньої температури по радіусу вежі. Тому цими авторами розроблено модель обміну теплом та кількістю руху в газовій фазі. Перенесення тепла було розглянуто на базі рівняння конвективного теплообміну з розподіленням джерелом тепла

$$W_z \frac{\partial \theta_c}{\partial z} + W_y \frac{\partial \theta_c}{\partial y} = \frac{\lambda_{ef}}{c_p \rho_c} \left(\frac{\partial^2 \theta_c}{\partial y^2} + \frac{1}{y} \frac{\partial \theta_c}{\partial y} \right) + \frac{q}{c_p \rho_c}, \quad (1.7)$$

$$q = 4\pi \sum_j \frac{\alpha_j \left(\theta_j(R) - \theta_c \right) R^2}{\nu} \frac{dN_j}{dS}.$$

Умова на межі факела зрошення

$$-2\lambda_{ef} f(z) \frac{\partial \theta_c(f(z))}{\partial y} = u_1(z) c_p \rho_c \frac{\partial \theta_c(f(z))}{\partial z} \left(R_b^2 - f^2(z) \right). \quad (1.8)$$

Розглянуто також вплив ваги гранул та теплової конвекції на рух гранул у грануляційній вежі

$$f_\xi = \frac{\pi}{2S} \frac{1}{f_i(z)} \int_R \xi \sqrt{w_y^2 + w_z^2} w \frac{R^2}{|w|} dN, \quad (1.9)$$

$$f_\beta = -g\beta \frac{\rho - \rho_c}{\rho} \left(\theta_c - \theta_{co} \right).$$

З урахуванням цього було розглянуто механіку газової фази та розраховано траєкторії руху гранул. Було також розроблено ітераційний алгоритм розв'язання рівнянь перенесення тепла та кількості руху в газовій та дисперсній фазах.

Залишилося відкритим питання про фактори, що визначають перенесення тепла по радіусу грануляційної вежі та значення коефіцієнта теплопровідності.

Найбільш повний математичний опис досягнуто в роботі [30], де проведено вичерпний аналіз механізму гранулоутворення, об'єднано існуючі теорії та видано характеристики щодо поліпшення умов тепломасообміну в просторі грануляційних веж.

1.3 Рух гранул під час вільного падіння

Характер руху гранул та закономірності їх розподілу по перерізу грануляційної вежі мають великий вплив на ефективність процесу гранулоутворення, час та висоту падіння гранул [8]. Для визначення основних геометричних характеристик грануляційних веж та розрахунку процесу кристалізації знання цих характеристик має першочергове значення.

З метою опису особливостей та вибору рівнянь руху гранул у грануляційній вежі насамперед необхідно встановити ступінь стисненості гранул та режиму їх обтікання газовим потоком [6].

Розрахунок проводиться з урахуванням умови відсутності взаємного впливу гранул одна на одну, тобто спирається на закономірності, що притаманні для одиночної сферичної частки [1, 2].

Наведемо алгоритм розрахунку процесу гранулоутворення під час вільного падіння крапель розплаву.

Тіло, що падає у газовому середовищі, рухається під дією сили тяжіння та сили опору. Силою Архімеда у випадку, що розглядається, можна знехтувати [53]

$$F \cdot \psi = B \cdot \omega^n. \quad (1.10)$$

У рівнянні (1.10) B – коефіцієнт, що є характеристикою форми та розміру тіла, густини та в'язкості середовища; n – параметр, що визначається режимом обтікання тіла середовищем. Коефіцієнт лобового опору ψ є функцією числа Рейнольдса.

Швидкість падіння гранул у грануляційній вежі коливається від 3-5 м/с до швидкості витання $\omega_{\text{вит}}$, що залежить від режиму обтікання, розміру та густини гранул. Для обчислення $\omega_{\text{вит}}$ в будь-якому режимі обтікання сферичної частки користуються такою формулою [7]:

$$\text{Re}_{\text{вит}} = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}. \quad (1.11)$$

Значення числа Рейнольдса в заданому діапазоні швидкостей залежить від розміру гранул. Наприклад, гранули аміачної селітри $d=1$ мм падають при перехідному режимі, гранули $d=2-3$ мм – при турбулентному [3].

Система диференціальних рівнянь двовимірного руху тіла при будь-якому режимі обтікання його середовищем має такий вигляд [53]:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2x}{d\tau^2} &= (-B\omega^n)_x, \\ m \frac{d^2y}{d\tau^2} &= (-B \cdot \omega^n)_y + mg. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Розв'язання задачі балістики тіла, що вилітає під кутом θ_0 до горизонту, базується на рівняннях [54]

$$\left. \begin{aligned} x &= 2,5\rho_T d_T \int_{p_0}^p \frac{dp}{C + \psi(p)} \\ y &= 2,5\rho_T d_T \int_{p_0}^p \frac{p dp}{C + \psi(p)} \\ \tau &= \sqrt{\frac{2,5\rho_T d_T}{g}} \int_{p_0}^p \frac{dp}{\sqrt{C + \psi(p)}} \\ \omega &= \sqrt{2,5\rho_T d_T g} \sqrt{\frac{1 + p^2}{C + \psi(p)}} \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

У рівнянні (1.13) $p = \operatorname{tg}\theta_0$, $C = \frac{\gamma_T d_T g}{0,4\omega_{0T}^2 \cos\theta_0} - \psi(p_0)$, $\psi(p) = p\sqrt{1+p^2} + \ln\left(p + \sqrt{1+p^2}\right)$.

Для вибору діаметра грануляційної вежі та параметрів гранулятора необхідно знати параметр x_{\max} – максимальну відстань польоту гранули. Зі збільшенням шляху польоту та наближенням траєкторії руху гранули до вертикального падіння значення p стає більшим 100. У цьому випадку проводимо заміну $\psi(p)$ на p^2 [2].

З урахуванням вищевикладеного запишемо вираз для обчислення однієї з координат (на прикладі координати x) з урахуванням (1.13) [1]:

$$x = 2,5\gamma_T d_T \left[\int_0^{100} \frac{dp}{C + \psi(p)} + \int_{100}^p \frac{dp}{C + p^2} \right]. \quad (1.14)$$

Однак сучасні грануляційні вежі мають швидкість повітря 1-2 м/с, тому необхідною стає умова урахування швидкості зустрічного потоку повітря.

Існують розрахункові формули, що враховують перелічені поправки та мають зручний для розрахунку вигляд. Наприклад, для веж висотою 30-40 м радіус кола зрошення обчислюється за такою залежністю [53]:

$$x_{\max} = \frac{u_0 \sin\theta_0}{Kg}, \quad (1.15)$$

де $K = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\zeta \rho f_m}{mg}}$; f_m - міделевий переріз гранули.

Для визначення радіуса факела зрошення (x_{op}) необхідно знати та врахувати радіус розсіювання гранул, що рухаються (r_1), та радіус гранулятора (r_{gp})

$$x_{op} = x_{\max} + r_1 + r_{gp}. \quad (1.16)$$

Значення r_1 обчислюється таким чином [53]:

$$r_1 = \sqrt{\frac{d_{ep} \zeta}{8\sigma^2 A^2 H_{пад}}}, \quad (1.17)$$

де A – коефіцієнт, що залежить від типу дроблення струменя; $H_{пад}$ – висота падіння.

При визначенні $H_{пад}$ тепловий розрахунок необхідно виконувати виходячи з умови вертикальної траєкторії падіння, оскільки у факелі зрошення їй відповідає найменший час падіння [7].

Залежність між швидкістю, часом та висотою вертикального падіння описується рівнянням Леппла [2]

$$\tau = \frac{2md_T}{\mu f_m} \int_{Re_0}^{Re} \frac{d Re}{\zeta Re_{вит}^2 - \zeta Re^2}. \quad (1.18)$$

де Re_0 , $Re_{вит}$, Re – числа Рейнольдса, що відповідають u_0 , $\omega_{вит}$ та швидкості, що досягнута за час τ .

Значення ζ визначається відповідно до відносної швидкості системи «гранула - повітря». Висота падіння визначається методом інтегрування [7, 55]

$$H_{пад} = \int_0^{\tau} \omega_m d\tau. \quad (1.19)$$

На основі вищевказаних залежностей розроблено обчислювальну програму розрахунку динаміки руху гранули під час вільного падіння в просторі грануляційної вежі [30].

1.4. Механізм гранулоутворення у «киплячому» шарі

1.4.1. Загальні положення

Сутність процесу гранулоутворення в псевдозрідженому шарі полягає в тому, що гранулювання з одночасною сушкою проходить у робочому просторі апарата в потоці сушильного або охолоджуючого агента, що утворює «киплячий» шар гранул під час проходження крізь газорозподільні елементи різноманітної конфігурації [55].

Процес гранулоутворення у «киплячому» шарі включає до свого складу нанесення тонкого шару (плівки) на поверхню частинок та подальшу кристалізацію його з утворенням стійкої структури [7]. Тверда речовина, що надходить до псевдозрідженого шару з рідкою фазою (розчин, розплав), частково відкладається на поверхні часток, що формують псевдозріджений шар. Одночасно з процесом нанесення плівки рідкої фази на поверхню часток утворюються нові, самостійні центри гранулоутворення з твердої фази, що не досягли або не закріпилися на поверхні частинок [2].

Закономірності формування псевдозрідженого шару гранул [8], вплив технологічних і конструктивних параметрів на процес створення «киплячого шару» [6], особливості апаратурного оформлення грануляторів псевдозрідженого шару [56] – комплексна проблема, вирішення якої потребує всебічного та глибокого аналізу. Вирішенню цієї проблеми присвячено ряд наукових праць, монографій та дисертаційних робіт [57-64].

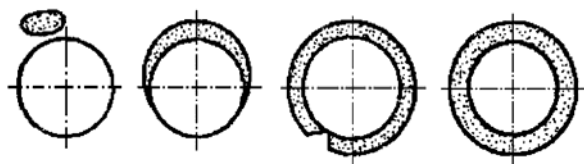


Рис. 1.10. Схема взаємодії крапель і твердих частинок (гранул) та етапів гранулоутворення [2].

Автори [6-8, 55, 56], виділяють такі переваги псевдозрідженого шару: інтенсивне перемішування твердої фази, що приводить до практичного вирівнювання температур і концентрацій в об'ємі псевдозрідженого шару;

високі значення коефіцієнта тепловіддачі від псевдозрідженого шару до поверхонь теплообміну (або навпаки); можливість використання твердих часток малих розмірів, тобто твердої фази з розвиненою питомою поверхнею; невеликий гідравлічний опір; висока питома продуктивність; невеликі капітальні витрати на виготовлення і монтаж апарата; висока якість гранульованого продукту; можливість безперервного ведення процесу при його повній автоматизації і механізації; поєднання процесів обезводнення (охолодження) і грануляції, що спрощує схему виробництва.

1.4.2. Кінетика росту та руху гранул у псевдозрідженому шарі

Розподіл часток за розмірами є важливим якісним та кількісним технологічним показником, що враховується під час розрахунку процесів псевдозрідження. В процесі агломерації часток з розчинів та розплавів у апаратах псевдозрідженого шару відбувається безперервна зміна розмірів часок за рахунок ряду факторів (зростання розміру часток внаслідок відкладення на поверхні твердої фази терпкого розчину, зменшення розміру за рахунок дроблення та стирання та ін.) [6].

Формування гранулометричного складу в апаратах киплячого шару визначається різноманітними факторами. Встановлена залежність кінетики гранулоутворення від режимних параметрів процесу (швидкість псевдозрідження, фізико-хімічні властивості матеріалу та ін.), методів організації процесу (рецикл, безрецикловий), конструктивних параметрів апаратів [7, 56].

Залежно від організації процесу укрупнення частинок, опис має такий вигляд [60]:

- гранулювання без вторинних явищ

$$\frac{dD_{\tau}}{d\tau} \neq 0; \frac{d\rho(D_{\tau})}{d\tau} \neq 0; \frac{dM_{\text{ш}}}{d\tau} \neq 0; \frac{dN_{\text{ш}}}{d\tau} = 0, \quad (1.20)$$

- гранулювання з агломерацією, стиранням та ін.

$$\frac{dD_{\tau}}{d\tau} \neq 0; \frac{d\rho(D_{\tau})}{d\tau} \neq 0; \frac{dG_{\text{ш}}}{d\tau} \neq 0; \frac{dN_{\text{ш}}}{d\tau} \neq 0. \quad (1.21)$$

В рівняннях (1.20), (1.21) D_{τ} - середній поточний діаметр частинок у киплячому шарі; $\rho(D_{\tau})$ - густина розподілу частинок за розмірами; $M_{ш}$ - маса псевдозріджених частинок; $N_{ш}$ - загальна кількість частинок у шарі.

Для опису кінетики росту гранул найбільш широке використання знайшла максимально зручна та природна гіпотеза поверхневого («нормального») росту гранул [65]. Згідно з нею матеріал на гранулах відкладається у вигляді кілець. Запропонований механізм передбачає розгляд таких методів [58]: кінетику швидкості росту окремої частинки, кінетику швидкості росту еквівалентного діаметра росту часток у псевдозрідженому шарі та кінетику зміни функції розподілу частинок за розмірами.

Рівняння кінетики швидкості росту окремої частинки описують її зростання по відношенню до її розміру та характеризують якісний бік процесу. Рівняння, що відносяться до даної групи, можуть мати як нульовий, так і більш високий порядок. У разі нульового порядку швидкість росту часток не залежить від їх діаметра. В іншому випадку зростання частинки є функцією від її розміру, що за фізичним змістом є розміром окремо взятої частинки.

Одним із перших науковців, що намагались описати кінетику росту окремої частинки, був Данлоп [66]. При дослідженні процесу росту важких нафтових залишків на твердому теплоносії в апараті псевдозрідженого шару було доведено, що зростання окремих частинок не залежить від їх розмірів і характеризується таким рівнянням:

$$D = D_0 + k \cdot \tau. \quad (1.22)$$

Паралельно з Данлопом Лі [67] вивчав процес зневоднення розчинів солей алюмінію й отримав аналогічне рівняння. На відміну від Данлопа, який вважав, що константа швидкості k має однакове значення для всіх частинок, на думку Лі константа швидкості залежить від ряду факторів (витрата розчину, його фізико-хімічних властивостей, швидкості псевдозрідження та ін.).

Гріммет [68] застосував такий підхід під час вивчення процесу кальцинації у псевдозрідженому шарі. Автор отримав рівняння швидкості росту окремої частинки, припустивши, що кожна частка проводитиме в зоні зрошення однакову кількість часу, обертання частинки рівномірне, а також, що поверхня псевдозрідженого шару є сумою поверхонь всіх частинок:

$$\frac{dD_i}{d\tau} = \frac{2}{\sum_{i=1}^{i=\infty} A_i N_i} \frac{P}{\rho}, \quad (1.23)$$

де P – витрата твердої фази продукту, що розпилюється; ρ – густина твердої фази продукту, що розпилюється; A_i – поверхня частинки, розмір якої знаходиться в інтервалі; N_i – кількість частинок i -го розміру.

У випадку залежності часу перебування частинок в зоні зрошення від їх розміру, вищезазначене рівняння матиме вигляд

$$\frac{dD_i}{d\tau} = \frac{2}{\sum_{i=1}^{i=\infty} A_i N_i} \frac{P}{\rho} (a + bD_i), \quad (1.24)$$

де a і b – емпіричні константи.

Недолік останнього рівняння – застосовність лише в межах процесу, що розглядається, оскільки значення емпіричних констант зумовлені фізико-хімічними властивостями матеріалу, що розпилюється у псевдозрідженому шарі.

Кінетичні рівняння швидкості росту еквівалентного діаметра часток псевдозрідженого шару описує кількісний бік процесу і характеризують швидкість росту всіх частинок. Розмір, що входить до складу цих рівнянь, за фізичним змістом є поточним розміром частинок псевдозрідженого шару. У тому разі, якщо злипання продукту є стадією, що лімітує процес гранулювання, кінетика агломерації описується рівняннями нульового порядку. Якщо вторинні процеси (стирання, дроблення) чинять значний вплив, рівняння мають більш високий порядок.

У вирішенні цієї проблеми значний внесок належить Н.А. Шаховій [69-73]. На основі дослідження процесу укрупнення часток розплавом сечовини в киплячому шарі, що супроводжується відхиленням від «нормального» зростання нею отримано такий вираз кінетики росту еквівалентного діаметра частинок киплячого шару:

$$\frac{dD}{d\tau} = k \frac{2G_M}{\gamma_M F_{ш}} D, \quad (1.25)$$

де $F_{ш}$ - поверхня часток киплячого шару; k - коефіцієнт, що характеризує часику продукту, який іде на нові частинки, що виникають.

Підхід, що має найбільш загальний характер та широке застосування, базується на кінетичних рівняннях зміни функції розподілу часток за розмірами. Він найбільш комплексно та повною мірою відображає кінетику процесу агломерації, оскільки одночасно характеризує кількісну та якісну сторони процесу.

Хатрантоніз [74] у своїй роботі наводить рівняння балансу кількості часток у киплячому шарі при усталеному режимі його роботи

$$\begin{aligned} & \frac{F_c}{W} \rho_{0p}(D) - \left(\frac{F_1}{W} + K_e(D) \right) \rho_{bl}(D) - \frac{d}{dD} \left[\rho_{bl}(D) R_p(D) \right] + \\ & + \frac{3D^3}{\pi\rho} \int_{D_\tau}^D \sqrt{D^3 - D_e^3} K_{ag}(d, D') \times \frac{\rho_{bl}(d) \rho_b(D')}{d^5 D_\Delta} dD' - \\ & - 6 \frac{\rho_{bl}(D)}{\pi\rho} \int_{D_e}^D \max K_{ag}(D, D') \times \frac{\rho_{bl}(D')}{D'^3} dD' + \rho_{bl}(D) \times \frac{3}{D} \left[R_p(D) - R_b(D) \right] = 0. \end{aligned} \quad (1.26)$$

$$\text{У рівнянні (1.26) } d = \sqrt[3]{D^3 - D'^3} \text{ і } K_{ag}(D, D') = K \left(D_i^4 - D_j^4 \right) \left(\frac{1}{D_i^3} + \frac{1}{D_j^3} \right).$$

Кунії та Левеншпілем [61] отримано таку систему рівнянь:

$$\rho_b(D_\tau)R_b(D_\tau) = \frac{F_c}{W}, \quad (1.27)$$

$$\rho_b(D) = \rho_b(D_\tau) \text{ при } D \rightarrow D_\tau.$$

При сумісному вирішенні рівнянь Хатрантоніз та Кунії-Левеншпіля отримується функція густини розподілу частинок.

У реальному процесі взаємодія одинарних крапель та гранул ускладнена можливістю контакту гранули з декількома краплинами, передачі частини рідини з гранули на гранулу під час їх тертя, обертання гранули і таке інше [6, 8].

Під час дослідження процесу кристалізації з розчинів у киплячому шарі Стрельцов [59] при описі процесу агломерації вводить функцію $\phi(\vartheta, \omega)$, яка характеризує вірогідність зрощування та зіткнення частинок різних фракцій. Зміна гранулометричного складу псевдозрідженого шару описується диференціально-інтегральним рівнянням балансу частинок

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial N(\vartheta, \tau)}{\partial \tau} \right]_{V_j, \theta} &= \left[\frac{\partial N(\vartheta, \tau)}{\partial \vartheta} \right]_{V_j, \theta} \cdot \left[\frac{\partial \vartheta(\vartheta, \tau)}{\partial \vartheta} \right]_{V_j, \theta} - \\ &- \frac{0,5}{m_{ш}} \int_{V=V_j}^{V=V_{\max}} \left[\frac{\partial N(\vartheta, \tau)}{\partial \vartheta} \right]_{\theta} \left\{ \int_{W=V_j-V}^{W=V_{\max}} \left[\frac{\partial N(\omega, \tau)}{\partial \omega} \right]_{\theta} \cdot \phi(\vartheta, \omega) \cdot d\omega \right\} d\vartheta + \\ &+ \frac{0,5}{m_{ш}} \int_{V=V_{\max}}^{V=V_j} \left[\frac{\partial N(\vartheta, \tau)}{\partial \vartheta} \right]_{\theta} \left\{ \int_{W=V_j-V}^{W=V_j} \left[\frac{\partial N(\omega, \tau)}{\partial \omega} \right]_{\theta} \cdot \phi(\vartheta, \omega) \cdot d\omega \right\} d\vartheta. \end{aligned} \quad (1.28)$$

У рівнянні (1.28) N – кумулятивна кількість частинок; ϑ, ω - об'єм фракцій, що агломеруються; $m_{ш}$ - маса киплячого шару.

Значення функції $\phi(\vartheta, \omega)$ отримується дослідним шляхом.

Афанасьєва [75], досліджуючи явища агломерації в псевдозрідженому шарі, наводить такий вигляд швидкості процесу:

$$\frac{dN}{d\tau} = kV\xi. \quad (1.29)$$

де V – об'єм псевдозрідженого шару; k – коефіцієнт пропорційності; ξ – рушійна сила процесу.

У роботах [58, 59] наведено нелінійне інтегральне рівняння для визначення чисельної густини розподілу часток за розмірами, що враховує внесок процесу агломерування та руйнування частинок у формування функції розподілу

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \int_0^\infty \lambda(y, x-y) f(x-y) f(y) dy - f(x) \int_0^\infty \lambda(x, y) f(y) dy = \\ = - \int_0^\infty b(y) P(x, y) f(y) dy + b(x) f(x). \end{aligned} \quad (1.30)$$

Виходячи з припущення про гомогенність функцій, що входять до складу рівнянь

$$\begin{aligned} \lambda(ax, ay) &= a^\gamma K(x, y), \\ P(x, y) &= p \left(\frac{x}{y} \right) / y, \\ b(D) &= BD^b, \end{aligned} \quad (1.31)$$

автори робіт стверджують, що розподіл частинок в усталеному режимі буде залежати від характеру кривої швидкості агломерації $K(x, y)$ та величини b , що входить до рівняння руйнування частинок, і не буде залежати від B та величини швидкості росту.

У цих самих роботах наведено математичну модель агломерації частинок під час здійснення процесу гранулювання дрібних зародків у киплячому шарі, що рухаються хаотично.

Авторами отримано наступний такий для опису кінетики гранулоутворення:

$$\frac{dN_i(t)}{d\tau} = -2\lambda(\tau)N_i(t) + \frac{\lambda(\tau)}{N(t)} \sum_{j=1}^{i-1} N_i(t)N_{i-j}(t), \quad (1.32)$$

де $\frac{dN_i(t)}{d\tau}$ - кількість зародків визначеного розміру; $\frac{dN(t)}{d\tau}$ - повне число

зародків у системі за час t ; $\lambda(\tau) = \frac{k\beta(\tau)}{2}$ - функція швидкості агломерації; $\beta(\tau)$ - вірогіднісна функція; k - коефіцієнт пропорційності.

У роботі Круглова і співавт. [76] було досліджено процес агломерації дрібнодисперсних частинок під час отримання мінеральних добрив. Авторами розроблено математичну модель, яка характеризує стаціонарний процес агломерації в киплячому шарі

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= A_1 \left(\frac{1-\gamma_1}{\gamma_1} \right); \\ q_2 &= \left(A_2 + \frac{q_1}{1-\gamma_1} \gamma_1 \rho_{1-2} \right) \left(\frac{1-\gamma_2}{\gamma_2} \right); \\ q_3 &= \left(A_3 + \frac{q_1}{1-\gamma_1} \gamma_1 \rho_{1-3} + \frac{q_2}{1-\gamma_2} \gamma_2 \rho_{2-3} \right) \left(\frac{1-\gamma_3}{\gamma_3} \right); \\ &\dots\dots\dots \\ q_n &= \left(A_n + \frac{q_1}{1-\gamma_1} \gamma_1 \rho_{1-n} + \frac{q_2}{1-\gamma_2} \gamma_2 \rho_{2-n} + \dots + \frac{q_{n-1}}{1-\gamma_{n-1}} \gamma_{n-1} \rho_{(n-1)-n} \right) \left(\frac{1-\gamma_n}{\gamma_n} \right); \end{aligned} \right\} (1.33)$$

$$A_n = (F_1 j_n - F_4 P_n^0 \psi_n) \tau.$$

Робота [58] підсумовує наявні на цей час математичні моделі кінетики процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі та об'єднує основні аспекти й результати попередніх науковців у комплексну математичну модель стосовно процесу гранулювання деяких класів мінеральних добрив.

Експериментальні дослідження кінетики росту частинок [6, 56, 57, 59, 77] у псевдозрідженому шарі підтверджують усталений характер залежності збільшення розміру гранул. Однак думки про ступінь цього впливу не однозначні. Так, у одних працях вказується на монотонний характер залежності збільшення розміру гранул від діаметра, а в інших виявлений екстремальний характер цієї залежності, який пояснюється різною вірогідністю виходу гранул різного розміру у зону зрошення та розвантаження.

1.4.3. Апаратурне оформлення процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі

Розвиток теоретичних основ і техніки псевдозрідженого і фонтануючого шарів останніми роками привів до створення і впровадження в промисловість ряду нових конструкцій грануляторів [6-8, 56].

Використання грануляторів зваженого шару є актуальним в умовах виробництва гранульованих продуктів на виробництвах малої чи середньої потужності [6-8].

Для проведення процесів тепломасообміну у зваженому шарі використовуються різноманітні конструкції апаратів [6-8, 78-101]. Класифікація апаратів зваженого шару для проведення процесів гранулювання наведена рис 1.11.

Основні різновиди грануляторів зваженого шару залежно від ознак наведено на рис. 1.12-1.31. Форма апарата визначає його гідродинамічні особливості. Так, у конічних апаратах з кутом розкриття до 20° відбувається рівномірне псевдозрідження по всьому перерізу, тоді як при збільшенні кута розкриття виникає розріджене центральне ядро й утворюється щільніший, сповзаючий біля стінок шар, тобто відбувається фонтанування. У циліндрових апаратах, як правило, режим псевдозрідження такий, що в циліндровій частині шар твердих частинок відсутній. Апарати прямокутної форми використовують для направленої переміщення твердих часток при перехресному русі теплоносія. Квадратний переріз найбільш зручний для відпрацювання процесу в напівпромислових умовах з подальшим використанням одержаних даних для конструювання прямокутних апаратів великої продуктивності [7].

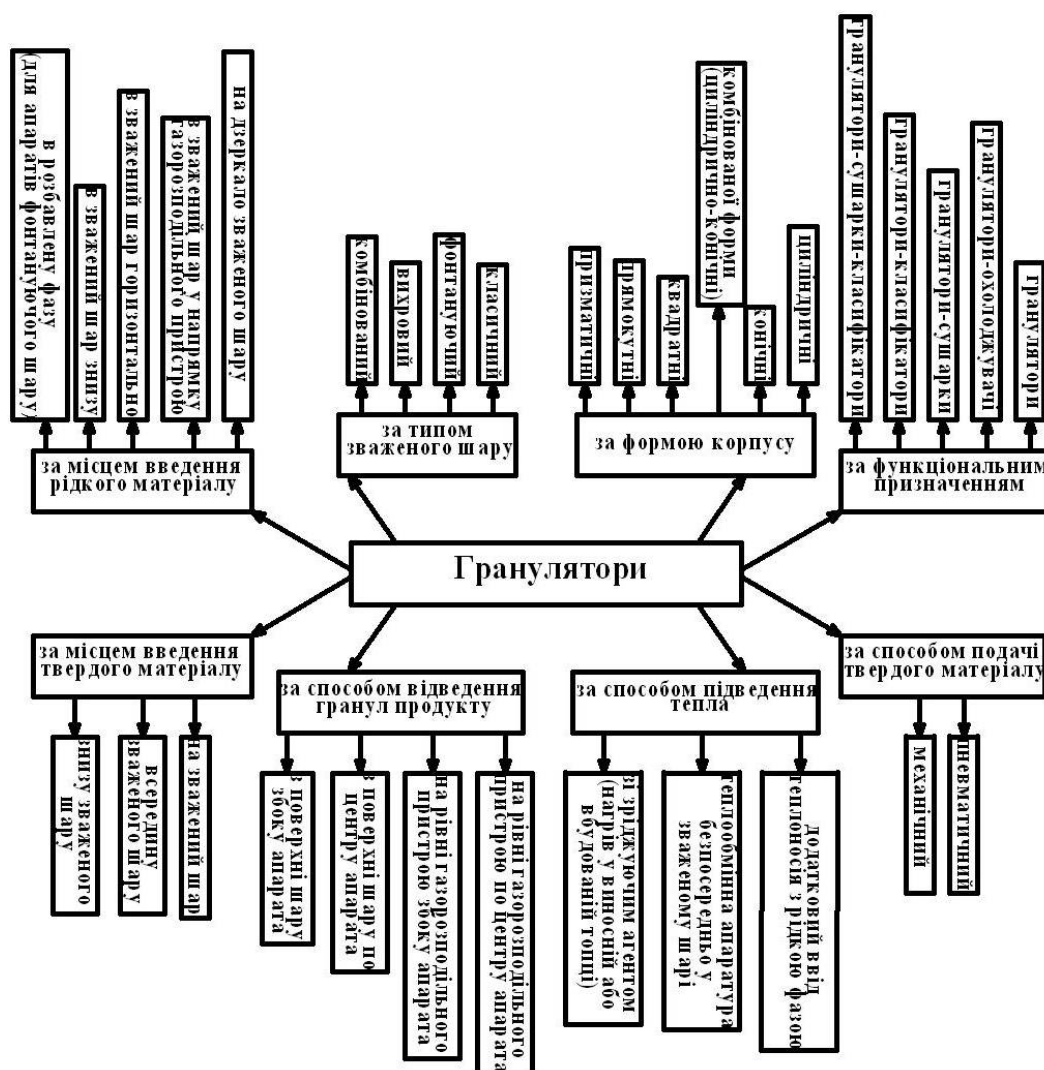


Рис. 1.11. Класифікація грануляторів псевдозрідженого шару.

Гранулятори із псевдозрідженим шаром розрізняються також місцем розміщення і конструкцією розподільника рідини, живильника твердої фази, пристрою для вивантаження продукту, а також способом підведення тепла. Рідину подають зверху на дзеркало псевдозрідженого шару, в шар у напрямку до газорозподільних ґрат і горизонтально, а також знизу [6].

Пневматичне розпилювання рідини над шаром шляхом взаємодії двох протилежно спрямованих потоків приводить або до зменшення інтенсивності псевдозрідження, або до значного винесення дрібної фракції з апарата [8].

Проте при правильно вибраному конструктивному оформленні такий спосіб подачі рідини виявляється досить ефективним, оскільки відбувається хвилеподібне викривлення поверхні шару, при якому різко збільшується площа контакту двох зустрічних потоків і тим самим інтенсифікуються процеси тепло-

і масообміну. Цей спосіб подачі рідини успішно використовується при грануляції з розчинів з високим вмістом вологи [7].

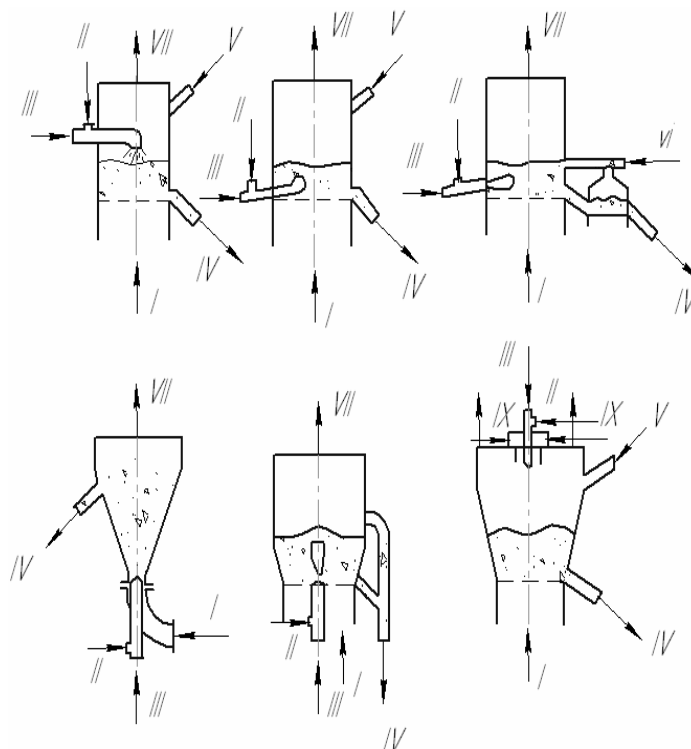


Рис. 1.12. Схеми апаратів для грануляції мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі [5]:

I - зріджуючий агент; II - початкова речовина; III- розпилювальний агент; IV - готовий гранульований продукт; V - ретур; VI - сепарувальне повітря; VII - відпрацьовані гази; VIII - повітря на класифікацію частинок; IX – теплоносій.

Для подачі рідини в шар найбільш доцільно встановлювати форсунки на бічній стінці гранулятора, щоб розміщення факела рідини було горизонтальним. Відстань сопла від газорозподільних ґрат повинна бути не менше максимального радіуса струменя [7].

Розпилювання механічною форсункою відразу в псевдозріджений шар неможливе, оскільки швидкість виходу рідини невелика (3-6 м/с) і відсутній вільний простір у шарі, необхідний для розпаду струменя рідини. Прагнення до зменшення питомих витрат енергії на розпилювання рідини в шар привело до ідеї створення комбінованої форсунки, в якій розпилювання здійснюється під тиском рідини, що подається у вільний простір шару, який утворюється при

швидкості низьконапірного зріджуючого агента 10-50 м/с. За необхідності зріджуючий агент може транспортувати тверді частинки і тепло в шар [6].

Якщо влаговміст відпрацьованого сушильного агента дозволяє одержувати продукт необхідної якості, то найбільш раціональна подача рідини в псевдозріджений шар. При такій подачі знижується віднесення і створюються сприятливі умови для розвитку факела і збільшення поверхні зрошування [8].

При подачі рідини в шар знизу довжина факела, а отже, і продуктивність форсунки обмежені висотою шару. Тому при переході на великі апарати і збереженні тієї самої висоти шару необхідно встановлювати багато форсунок обмеженої продуктивності, що ускладнює конструкцію та експлуатацію гранулятора.

Збільшення продуктивності гранулятора повинне супроводжуватися підвищенням продуктивності кожної форсунки за рахунок збільшення поверхні зрошування. При подачі рідини на шар продуктивність форсунки обмежена площею дзеркала шару, тоді як при горизонтальній подачі в шар поверхня зрошування може бути набагато більшою [8].

Процес гранулювання у псевдозрідженому шарі ведуть як з подачею тільки рідкої фази, так і з подачею рідкої і твердої фаз. Остання може бути одним із компонентів продукту (наприклад, сечовина в складно-змішаних добривах); речовиною, плавкою в шарі (наприклад, мірабіліт); рециклом (ретуром), тобто тим самим продуктом у вигляді дрібних гранул і пилу.

Тверду фазу подають у шар механічним або пневматичним способом, використовуючи для цього окремий пристрій або спеціальний вузол для одночасної подачі рідини і твердого компонента. Продукт вивантажується з гранулятора з поверхні шару збоку або по центру апарата, а також на рівні газорозподільних ґрат збоку або по центру. Через нижнє вивантаження виходять гранули всіх розмірів [95].

Значне спрощення технологічної схеми грануляції досягається селективним вивантаженням продукту з гранулятора. Сепарація частинок відбувається в класифікаторах різних конструкцій [6, 7, 95].

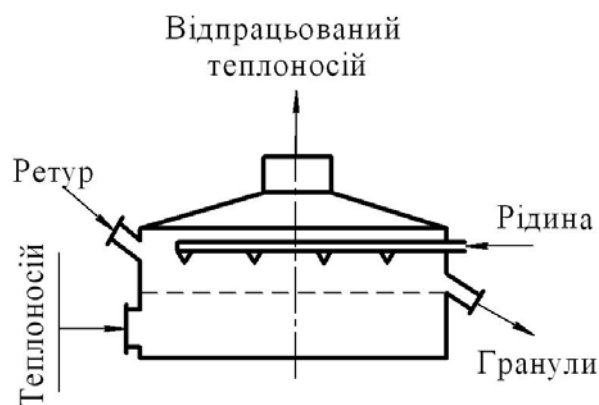


Рис. 1.13. Прямокутний апарат з подачею рідини на шар [8].

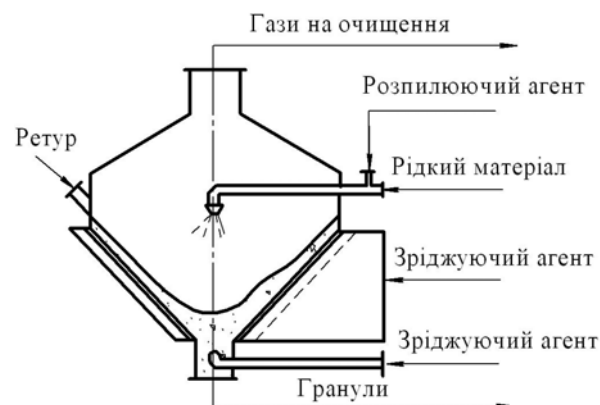


Рис. 1.14. Апарат з вихровим шаром гранул [7].

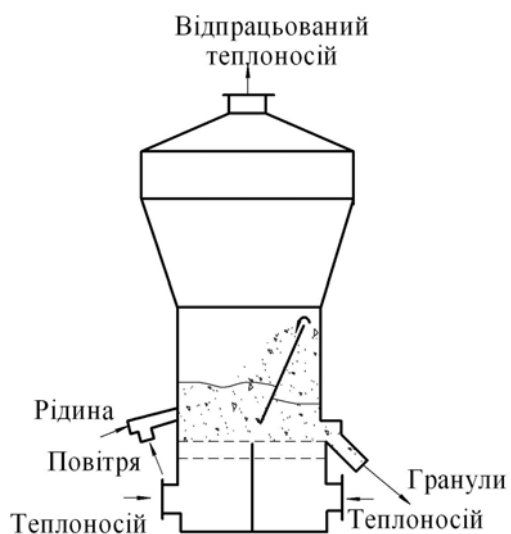


Рис. 1.15. Гранулятор-класифікатор [7].

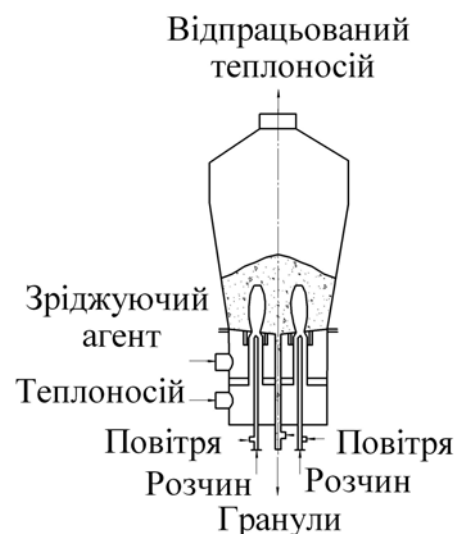


Рис. 1.16. Гранулятор із зонами локального фонтанування [6].

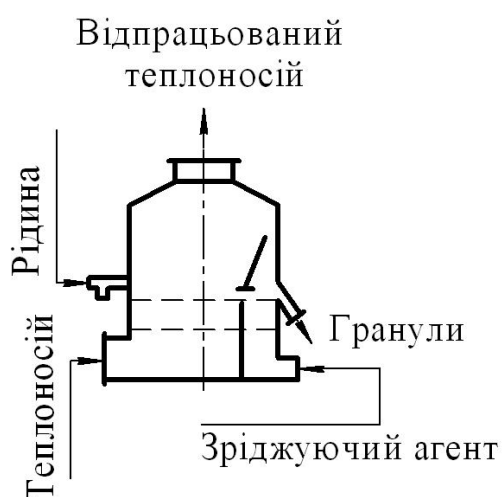


Рис. 1.17. Прямокутний двосекційний апарат для грануляції і класифікації (АГК) [6].

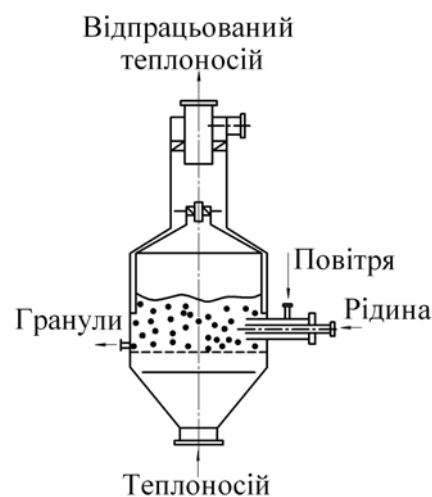


Рис. 1.18. Комбінований апарат-класифікатор потоками [89].

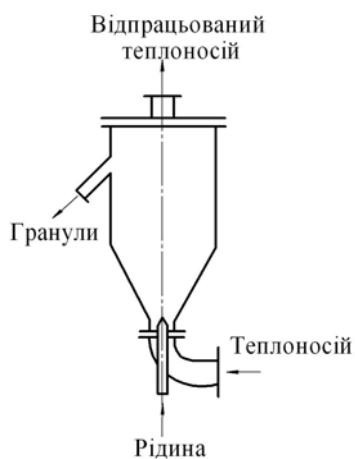


Рис. 1.19. Конічний апарат з фонтануючим шаром [8].

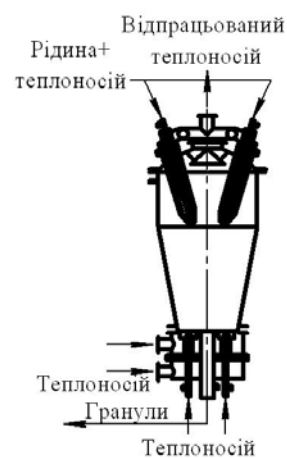


Рис. 1.20. Конічний апарат з комбінованим введенням рідини та теплоносія [6].

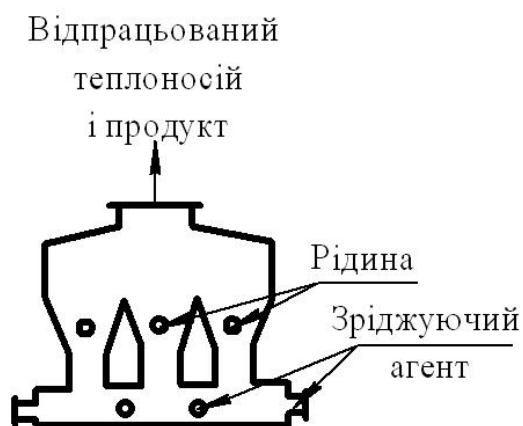


Рис. 1.21. Багатосекційний апарат з фонтануючим шаром та вивантаженням гранул зі зріджуючим агентом [6]

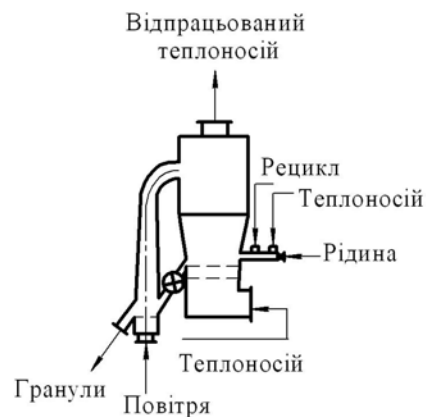


Рис. 1.22. Квадратний апарат з виносним конічним класифікатором [7]

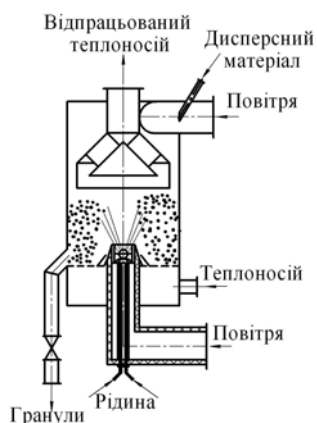


Рис. 1.23. Апарат з конусними вставками [92].

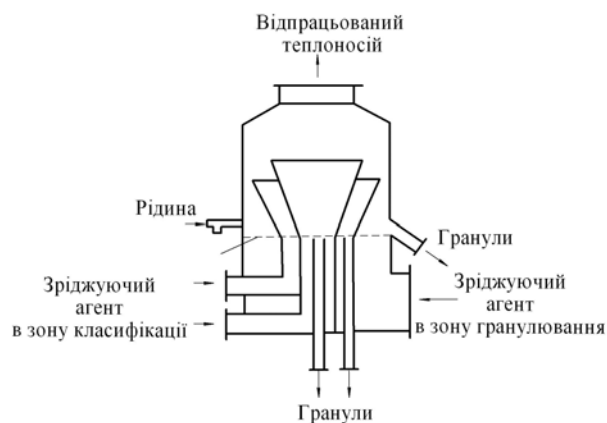


Рис. 1.24. Гранулятор із вбудованим багатосекційним класифікатором [7]

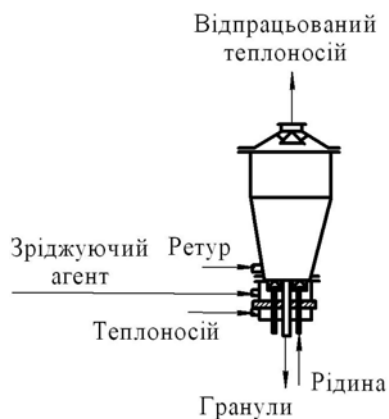


Рис. 1.25. Конічний апарат з високо-температурним теплоносієм з вантаженням знизу шару, подачею комбінованим введенням рідини і теплоносія і центральним сепаруючим вивантаженням [8].

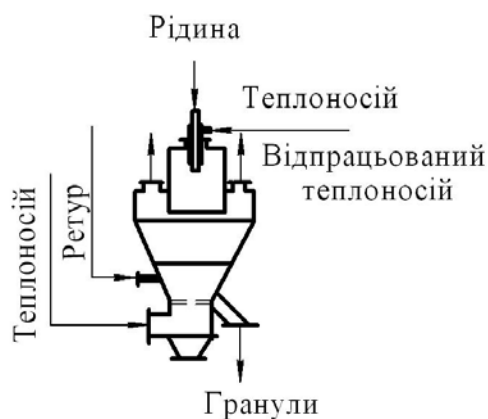


Рис. 1.26. Конічний апарат з бічним вивантаженням знизу шару, подачею рідини на шар і двопотоковою подачею теплоносія [8].

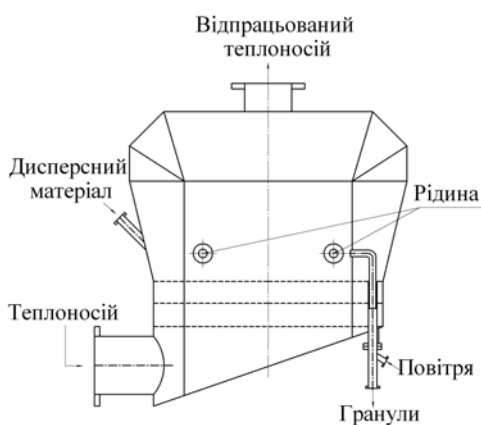


Рис. 1.27. Гранулятор з багатоступеневою класифікацією та сепарацією [88].

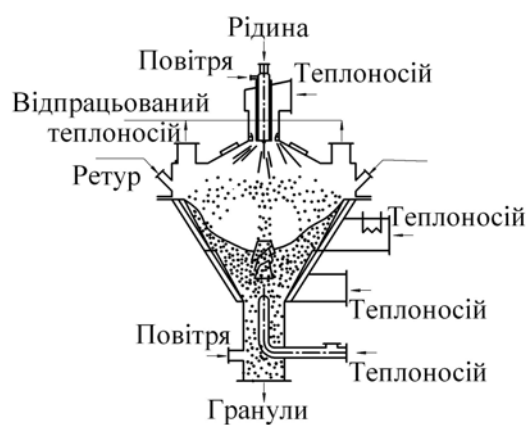


Рис. 1.28. Сушарка-гранулятор вихрового типу із зустрічними струменями [91].

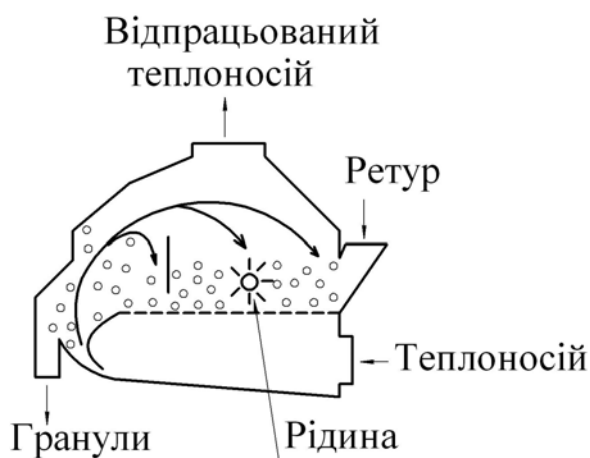


Рис. 1.29 - Гранулятор із сепарацією часток у вихровому шарі [94].

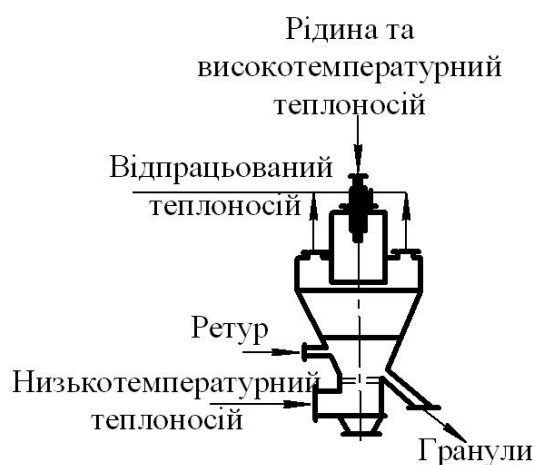


Рис. 1.30. Конічний апарат з двопотоковою подачею теплоносія [6].

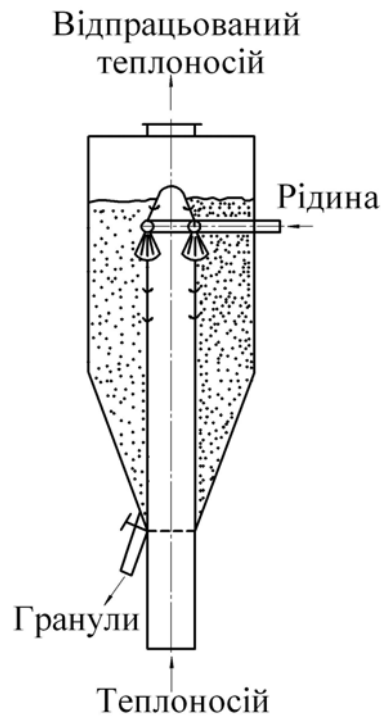


Рис. 1.31. Вихровий гранулятор з розпиленням у кільцеву зону [81].

1.5 Висновки до першого розділу, постановка задачі досліджень

Проведено огляд методів гранулювання за схемами баштового і безбаштового гранулювання, описано закономірності перебігу вищезазначених процесів, проаналізовано основні переваги та недоліки розглянутих способів гранулювання, підсумовано перспективи подальшого розвитку способів гранулювання.

Аналіз літературних джерел, що описують закономірності процесу гранулювання з використанням грануляційних веж та грануляторів псевдозрідженого шару, виявив можливість застосування в технології гранулювання методів зменшення габаритних розмірів апаратури, що властиві кожній з названих груп обладнання. На основі аналізу експериментально-теоретичних матеріалів, проведених у першому розділі, виявлено також недоліки в апаратному оформленні вищеназваних апаратів для гранулювання:

1. Грануляційні вежі:

- навантаження по перерізу вежі розподіляється нерівномірно;

- необхідність великої кількості повітря для охолодження гранул;
- проблеми забруднення атмосфери пилом;
- для виробництва гранул у вежах необхідне використання більш концентрованого розчину, ніж для грануляторів псевдозрідженого шару, і, як наслідок, додаткові витрати енергії на випарювання вологи;
- значні капіталовкладення під час будівництва та експлуатації.

2. Гранулятори псевдозрідженого шару:

- нерівномірність часу перебування в псевдозрідженому шарі часток твердої фази і зріджуючого агента (однаково можливі швидке проскакування частинок і їх перебування в шарі довше за середньостатистичний час);
- можливість у ряді випадків небажаної зміни властивостей твердих частинок (стирання, розтріскування, злипання та ін.);
- необхідність установки потужних пиловловлюючих апаратів на виході газів із псевдозрідженого шару, особливо при широкому гранулометричному складі твердої фази;
- ерозія апаратури в зоні псевдозрідженого шару, особливо значна у разі використання частинок з високими абразивними властивостями;
- обмеженість робочих швидкостей зріджуючого агента межами, відповідними початку псевдозрідження твердої фази та її віднесенню з шару;
- підвищені енерговитрати, пов'язані з нагнітанням сушильного агента;
- необхідність точного дозування рідкої фази, що значно ускладнює управління високопродуктивним виробництвом;
- низька стабільність киплячого шару в широкому діапазоні зміни навантажень по рідкій, твердій і газовій фазах.

Узагальнення та зіставлення окремих результатів попередніх авторів у цій області дають можливість зменшити вплив факторів, що дестабілізують процес гранулювання, запропонувавши нову конструкцію малогабаритних грануляційних пристроїв зі стабільними гідро- та термодинамічними показниками.

На підставі означених тез впливає доцільність комплексного поєднання переваг двох методів гранулювання і створення нового способу та пристрою для його здійснення.

Використання апаратів вихрового типу надає можливість зменшення висоти падіння гранули та надання їй додаткового обертового руху.

Метою дисертаційної роботи є розроблення та дослідження нової конструкції високоефективного апарата, який має низьку енергомісткість та високу питому потужність, для проведення процесу грануляції на основі використання закономірностей руху двофазного потоку у вихровому полі, створеному закрученою газовою фазою.

Досягнення поставленої мети стає можливим за умови поступового та обґрунтованого вирішення таких завдань:

1. Вивчення умов створення стабільного вихрового потоку теплоносія.
2. Розроблення фізичної моделі руху гранул у робочому просторі вихрового гранулятора.
3. Математичне моделювання гідродинаміки робочого простору вихрового гранулятора з метою отримання оптимальних гідродинамічних параметрів створення зваженого шару.
4. Одержання аналітичних залежностей в результаті розв'язання та аналізу рівнянь з метою прогнозування впливу різноманітних чинників на стабільність руху гранул у робочому просторі апарата та його габаритних розмірів.
5. Перевірка й уточнення отриманих теоретичних залежностей експериментальним шляхом.
6. Розроблення інженерної методики конструктивного розрахунку та проектування вихрових грануляторів, визначення основних вимог до апаратури вихрового типу за результатами експериментальних і теоретичних залежностей.
7. Дослідно-промислова апробація розробленого обладнання в промислову технологічну схему гранулювання.

Основні завдання досліджень та їх результати опубліковані в працях [98, 102-105].

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Загальна методика проведення досліджень

Основна мета досліджень - створення науково обґрунтованої методики розрахунку гідродинамічних чинників течій фаз у робочому просторі грануляційного пристрою, що має удосконалену конструкцію для забезпечення зниження висоти грануляційного пристрою, підвищення інтенсивності його функціонування, створення таких умов, щоб під час руху крапель розплаву відбувся процес гранулоутворення без з'єднання гранул чи їх подрібнення.

Для досягнення поставленої мети проведено математичне моделювання гідродинаміки потоків у вихрових апаратах зі зниженою висотою польоту гранул, експериментально досліджено гідродинаміку потоків у робочому просторі вихрового гранулятора, проаналізовано результати та розроблено методику гідродинамічного розрахунку малогабаритних вихрових апаратів змінного перерізу робочого простору зі зниженою висотою польоту гранул.

На етапі зіставлення результатів теоретичних та експериментальних досліджень з результатами комп'ютерного моделювання застосовано системи тривимірної твердотільної моделювання КОМПАС-3D (<http://www.ascon.ru/>), програмний комплекс FlowVision (<http://www.flowvision.ru>) та COSMOS FlowWorks 2006 Pre-Release. Побудову теоретичних залежностей виконано диференціальними методами математичного аналізу та інтегрального обчислення.

Натурні експерименти підпорядковано меті зіставлення їх результатів та теоретичних досліджень.

2.2. Методи і засоби математичного моделювання

Математичне моделювання здійснювалося на базі класичних положень механіки рідини та газу і технічної гідромеханіки. Розв'язання рівнянь математичної моделі здійснено за допомогою системи комп'ютерної математики Maple 9 [106]. На базі математичного моделювання створено програму розрахунку основних гідродинамічних показників потоків у робочому просторі вихрового гранулятора, яка виконана у середовищі Delphi [107]. Вхідними даними для цієї програми є витрати матеріальних потоків, геометричні параметри робочого простору апарата, фізико-хімічні та термодинамічні властивості потоків, початкові умови здійснення процесу. Вихідними даними розрахунку є гідродинамічні характеристики потоків у кожній з точок розрахункової області робочого простору вихрового гранулятора та траєкторія руху гранул.

Моделювання руху потоків за допомогою програмних продуктів COSMOS FlowWorks 2006 Pre-Release [108] та FlowVision 2003 demo [109] ґрунтується на кінцево-об'ємному методі розв'язування рівнянь гідродинаміки й використання прямокутної адаптивної сітки з локальним подрібненням. Для апроксимації криволінійної геометрії з підвищеною точністю використовується технологія підсіткової щільності геометрії. Ця технологія дозволяє імпортувати геометрію із систем САПР і обмінюватися інформацією із системами кінцево-елементного аналізу. Використання цієї технології дозволило вирішити проблему автоматичної генерації сітки — щоб згенерувати сітку, досить задати всього лише кілька параметрів, після чого сітка автоматично генерується для розрахункової області, що має геометрію будь-якого ступеня складності.

2.3. Будова експериментальної установки

Для проведення експериментів з дослідження гідродинамічних параметрів вихрового псевдозрідженого шару було спроектовано та виготовлено експе-

риментальну установку вихрового гранулятора, що передбачає у своїй конструкції окремі змінні елементи, комбінація яких відповідає конкретній серії дослідів, що проводяться. Схему установки наведено на рис. 2.1.

Принцип дії установки такий.

Повітря з навколишнього середовища через забірник засмоктується за рахунок створюваного зрідження радіальним вентилятором високого тиску 4 та подається до електрокалорифера 2, де відбувається його нагрівання до температури, передбаченої технологічним процесом гранулоутворення. За рахунок енергії, що отримана при проходженні радіального вентилятора, нагріте повітря по трубопроводу надходить до робочого простору вихрового гранулятора 1 і бере участь у створенні киплячого шару гранул.

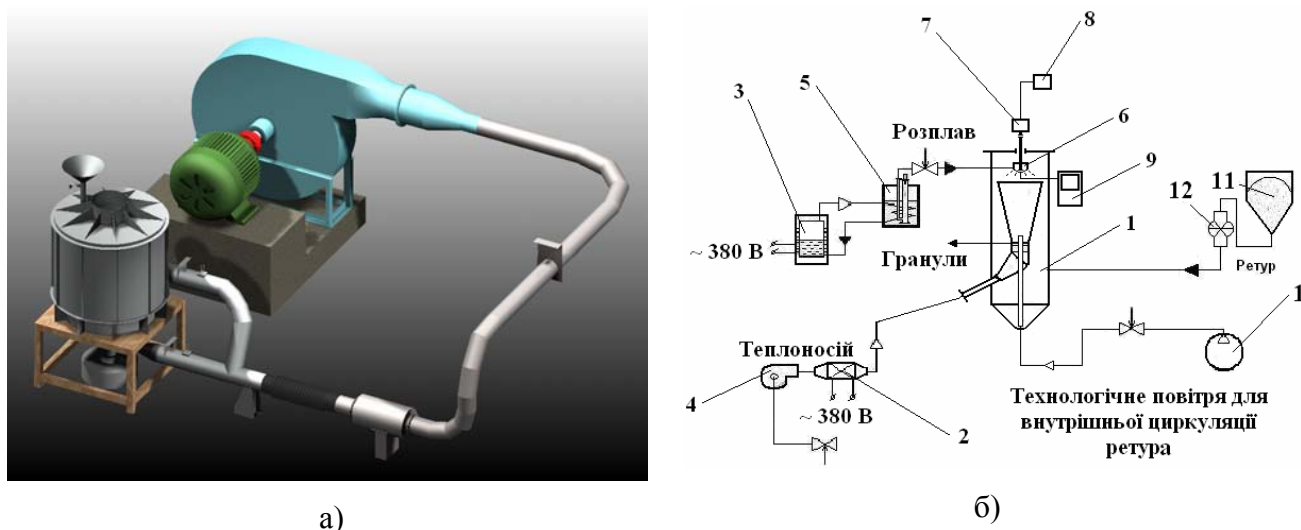


Рис. 2.1. Експериментальний стенд вихрового псевдозрідженого шару для отримання гранульованих продуктів: а) 3D модель установки; б) принципова схема: 1 – вихровий гранулятор; 2 - електрокалорифер; 3 - парогенератор; 4 - газодувка; 5 – ємність із заглибленим насосом; 6 – розпилювач; 7 – електромагнітний вібратор; 8 – електронний регулятор; 9 - частотомір; 10 – компресор; 11 – бункер; 12 - сегментний дозатор.

З метою створення розплаву до витратного баку надходить рідина із системи водопостачання. З витратного баку рідина надходить до ємності із заглибленим насосом 5, куди одночасно подається тверда фаза для створення розплаву (гранули нетоварної фракції, подрібнені відходи і таке інше). За рахунок теплової енергії парогенератора 3, змійовик якого знаходиться в об'ємі ємності,

створюється розплав. За допомогою заглибленого насоса розплав по трубопроводу надходить до розпилювача 6, що знаходиться у верхній частині експериментального зразка вихрового гранулятора. Робота розпилювача регулюється і контролюється електромагнітним вібратором 7, електронним регулятором 8 та частотоміром 9. Гранули ретура надходять до робочого простору вихрового гранулятора з бункера 11. Кількість гранул ретура регулюється сегментним дозатором 12. Компресором 10 нагнітається повітря для створення внутрішньої циркуляції ретура. Рідина для приготування розплаву до витратної ємності експериментальної установки подається з водопровідної мережі.

Основна частина експериментального стенда – дослідні зразки вихрового гранулятора псевдозрідженого шару, що подані на рис. 2.2 та 2.4.

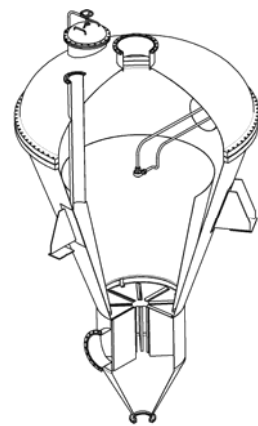


Рис. 2.2. Дослідний зразок вихрового гранулятора для вивчення впливу конструкції газорозподільних пристроїв на гідродинаміку та конфігурацію зваженого шару (стенд №1).



Рис. 2.3. Дослідний зразок вихрового гранулятора для визначення конфігурації зваженого шару (стенд № 2).

Основні геометричні характеристики стендів №1,2 вихрового гранулятора наведені на рис. 2.4.

В основу фізичного моделювання покладено методи теорії подібності. У дослідах на моделі змінено (порівняно з промисловими умовами) масштаб установки. Геометрична подібність дотримується рівністю констант та інваріант геометричної подібності. Також мається на увазі, що обов'язково дотримується подібність руху відповідних часток та їх траєкторій у натурі та в моделі.

Ця розробка дозволяє вирішити поставлену мету досліджень вихрового псевдозрідженого шару саме на підставі не окремих, а взаємозв'язаних серій експериментальних досліджень. Кожне з цих досліджень органічно доповнює одне одного та створює цілісне уявлення про закономірності гранулоутворення у закрученому газовому потоці теплоносія та гідродинамічних особливостей існування усталеного вихрового руху гранул.

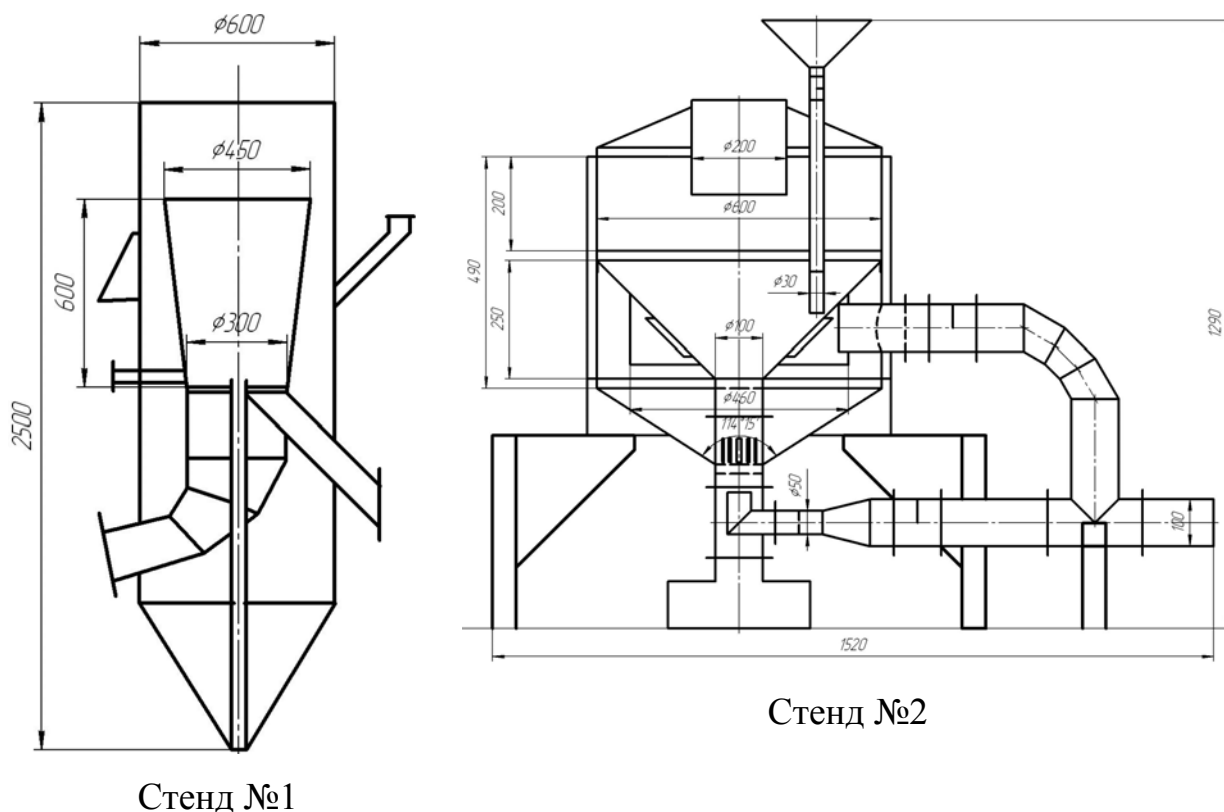
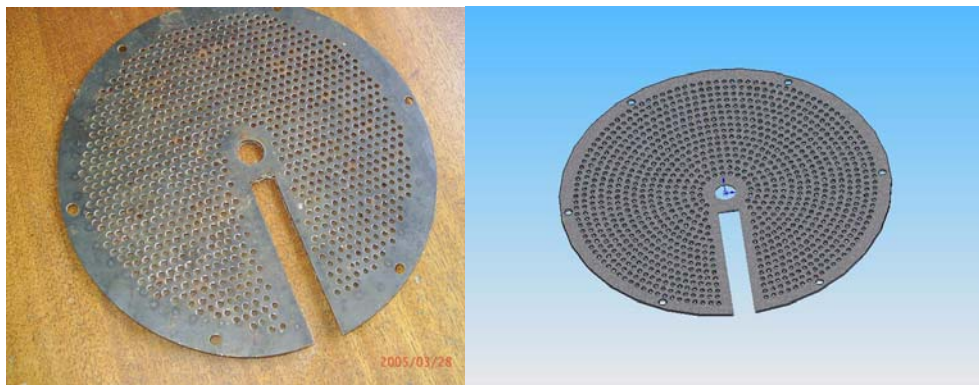
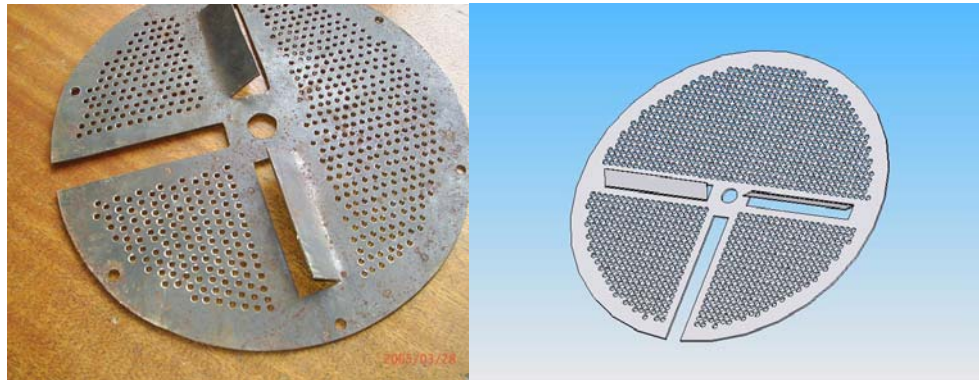


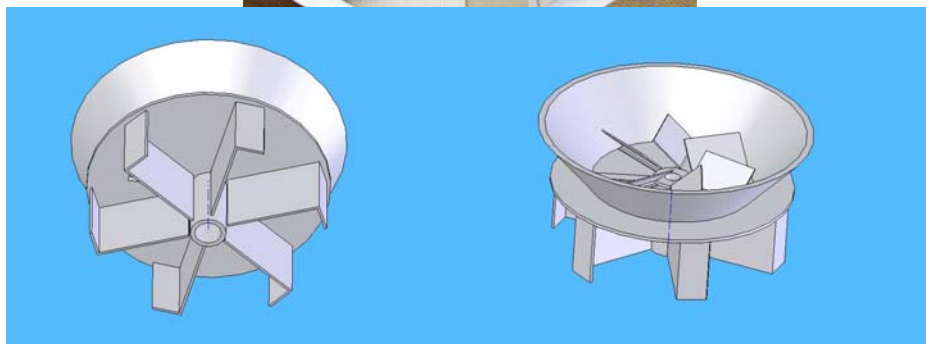
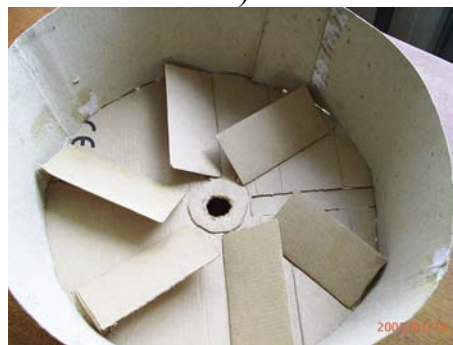
Рис. 2.4. Конструктивні розміри експериментальних зразків вихрового гранулятора псевдозрідженого шару (стенд №1 та №2).



а)



б)



в)

Рис. 2.5. Основні конструкції газорозподільних пристроїв (загальний вигляд та 3D-моделі): а) перфорований газорозподільний пристрій (№1); б) перфорований газорозподільний пристрій із завихрювачами (№2); в) газорозподільний пристрій з двома зонами створення вихрового газового потоку (№3).

Розроблені зразки вихрових грануляторів мають декілька особливостей, що виділяють їх серед існуючого на сьогодні грануляційного обладнання та сприяють підвищенню ефективності процесів тепломасообміну.

По-перше, це можливість швидкої заміни окремих конструктивних вузлів гранулятора з метою пристосування до конкретних заданих умов перебігу процесу та вимог до характеристики кінцевої продукції (наприклад, конфігурація робочого простору гранулятора та пристрою для розподілення головного потоку теплоносія на висхідну і тангенційну складові).

По-друге, це широкий спектр методів створення спрямованого руху газового потоку від класичного псевдозрідженого шару до його різновидів (фонтануючий, вихровий, комбінація різних конфігурацій псевдозрідженого шару в межах однієї робочої зони з можливістю їх постійного регулювання та зміни) за допомогою набору газорозподільних пристроїв та направляючих апаратів.

По-третє, це об'єднання декількох способів гранулоутворення при збереженні мінімальних габаритних розмірів апарата та надання йому переваг кожного із способів, що мають застосування під час процесу отримання гранульованого продукту.

З метою проведення максимально повного дослідження та обґрунтування результатів у межах одного стенда створено різноманітні умови для існування однофазного, двофазного та трифазного потоків. Це досягається особливістю конструктивного оформлення експериментального зразка вихрового гранулятора, що полягає в можливості демонтажу окремих елементів пристрою та встановлення нових складових частин гранулятора (рис. 2.5).

Запропонований двоступеневий контроль зміни технологічних характеристик одно- і двофазного вісесиметричних потоків у межах робочої порожнини пристрою з використанням стандартних засобів контролювання параметрів процесу (швидкість руху, витрата, тиск та ін.) і технологій сучасних цифрових засобів візуального спостереження за перебігом процесу гранулоутворення дозволить не тільки кількісно, а й якісно оцінити вплив зміни технологічних та конструктивних характеристик у процесі експерименту. Візуалізація результа-

тів дослідження в такому разі стає більш повною та вичерпною. Це стає основою подальшого всебічного глибокого аналізу проблеми, що розглядається в даній роботі.

2.4. Методика проведення експериментальних досліджень

Фізичний експеримент проведено шляхом експериментальних досліджень стендових зразків грануляційного обладнання та виконано на базі використання математичного апарату планування експерименту та математичної статистики.

2.4.1. Контроль та вимірювання технологічних параметрів процесу

Схема контрольованих параметрів подана на рис. 2.6.

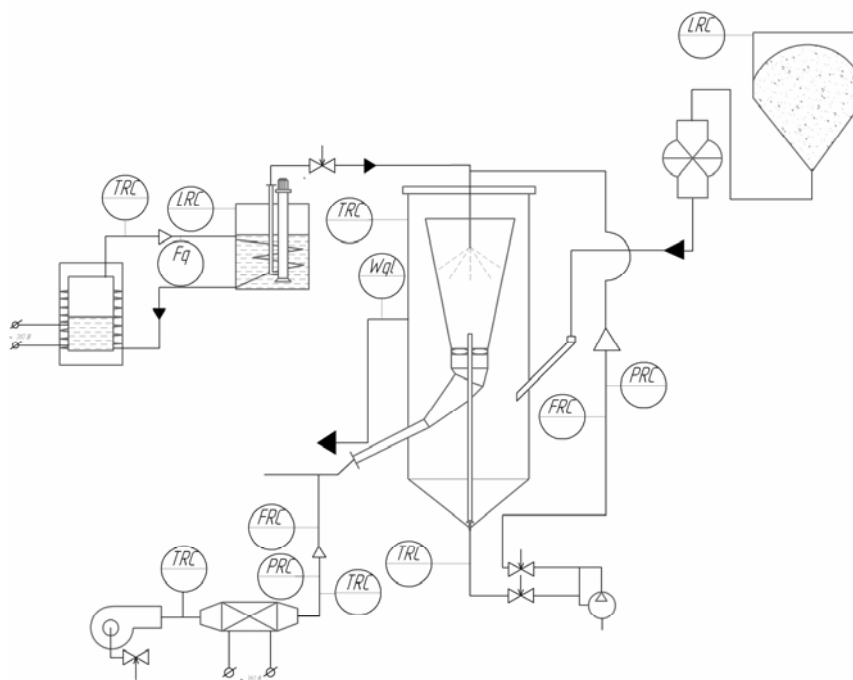


Рис. 2.6. Контрольовані параметри експериментального стенда.

Температура повітря, що надходить до калорифера з навколишнього середовища за допомогою повітродувки вимірювалася за допомогою ртутного термометра, відносна вологість повітря реєструвалася за допомогою психрометра.

Температура повітря, що надходить до робочого простору вихрового гранулятора, контролювалася за допомогою термоперетворювача опору з ана-

логовим приладом. Температура в робочому просторі вихрового гранулятора контролювалася та реєструвалася за допомогою набору приладів термоперетворювач опору – перетворювач вимірювальний – цифровий прилад. Витрата повітря до та після апарата, співвідношення витрат повітря на створення висхідного та тангенційного потоків повітря контролюється за допомогою камерних діафрагм як в якості первинного приладу, вимірювального перетворювача перепаду тиску та аналогового приладу. Зміна витрати повітря здійснюється за допомогою шиберної засувки, що розміщена після вентилятору та засувок на трубопроводах подачі повітря для створення висхідного та тангенційного потоків повітря. Вищезазначені прилади контролю та регулювання пройшли відповідні випробування згідно з методиками [110]. Витрата води, що надходить до ємності для приготування розплаву, контролюється ротаметром, який встановлено на трубопроводі подачі води. Експериментальний стенд обладнано пультом управління пускорегульовального обладнання. Методика проведення замірів та опис замірів спираються на рекомендації [111].

2.4.2. Контроль та вимірювання гідродинамічних характеристик у ході проведення експерименту

Серію досліджень гідродинамічних характеристик вихрових потоків здійснено на модельних установках вихрового гранулятора (рис. 2.2, 2.3) в складі експериментальної схеми безбаштового гранулювання (рис. 2.1).

Порядок проведення експерименту [110-112]:

- дослідження закрученого газового потоку з набором газорозподільних пристроїв;
- дослідження двофазної системи "газовий потік - тверді частинки (гранули)" з визначенням конфігурації зваженого шару.

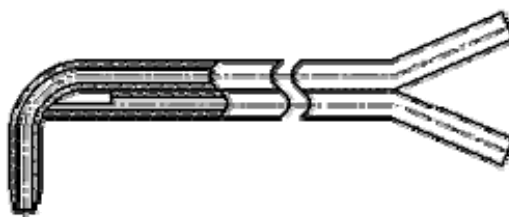


Рис. 2.7. Трубки Піто-Прандтля.

Газодинамічний опір повного газового потоку, опір висхідної і тангенційної складових газового потоку, опір псевдозрідженого шару, повний та статичний тиск до та після газорозподільного елемента – основні характеристики, що необхідно отримати для всебічного аналізу гідродинаміки робочого простору вихрового гранулятора. Для виміру цих характеристик у конструкції модельної установки наявні спеціальні вузли зі спарених трубок повного й статичного тиску, які введені до осі відповідних газопроводів у місцях контролю (трубки Піто-Прандтля – рис. 3.7) та з'єднані імпульсними трубками до U-подібних мікроманометрів. Як рідину в останніх використаний етиловий спирт (C_2H_5OH). Похибка вимірів повного й статичного тиску на вході повинна становити не більше ± 1 мм спиртового стовпчика. Тарування трубок Піто-Прандтля проведено на спеціальному аеродинамічному стенді.

Динамічний тиск (швидкісний напір) $p_{\text{дин}}$, Па, обчислюється таким чином [110]:

$$p_{\text{дин}} = p - p_{\text{ст}}, \quad (2.1)$$

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

Швидкість руху газового потоку по газопроводах v , м/с [110] -

$$v = \sqrt{\frac{2(p - p_{\text{ст}})}{\rho_{\text{г}}}}, \quad (2.2)$$

де $\rho_{\text{г}}$ – густина газу (повітря $\rho_{\text{г}}=1,21$ кг/м³ при $T=293$ К, $p=101,3 \cdot 10^3$ Па), кг/м³.

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

$$Q = vS, \quad (2.3)$$

де v – середня швидкість газу, розрахована для перерізу газопроводу, м/с; S – площа поперечного перерізу газопроводу в точці вимірювання, м².

Характер розподілу складових повної швидкості руху газового потоку в робочому просторі вихрового гранулятора досліджувався за допомогою кульового 5-канального аеродинамічного зонда (рис. 2.8). Для цього в конструкції кришки модельної установки передбачено вузол закріплення та переміщення зонда, який становив собою мікрокоординатник з можливістю переміщення зонда вздовж радіуса і висоти робочого простору з точністю до 0,5 мм та обертання на кут точністю до 1°. Аеродинамічний зонд імпульсними трубопроводами з'єднаний з мікроманометрами, що вели реєстрацію даних вимірювання. Для зменшення пульсацій стовпа рідини в мікроманометрі застосовуються демпфувальні вставки в гумові шланги. Градування зонда виконано еталонною трубкою Прандтля в аеродинамічній трубці зі строгою орієнтацією потоку в просторі.

Схему вимірювання гідродинамічних характеристик вихрового шару за допомогою зонда наведено на рис. 2.9. Зонд з використанням мікрокоординатника встановлюється в потрібне місце заміру. Для проведення необхідних вимірювань потрібно досягти такого положення зонда, при якому вектор швидкості знаходиться в площині отворів 1,2 та 3. Це досягається обертанням кульки навколо осі державки в просторі (характеристикою цього положення є кут φ) до моменту, коли тиск в отворах 4 та 5 буде однаковий. У цьому разі задача вимірювання спрощується до визначення значення вектора швидкості та його напрямку в площині 1-2-3, розміщення якої визначається за лімбом.

При досягненні необхідних умов розміщення зонда відраховується кут за лімбом та визначаються показники мікроманометрів $(h_2 - h_4)$; $(h_3 - h_1)$.

Основні залежності, що використовуються для визначення напрямку (кута δ , утвореного вектором швидкості з віссю центрального отвору 2 у площині 1-2-3 отворів кульки зонда), величини швидкості газового потоку v , м/с, і тиску p , Па, в точці заміру [110]

$$\delta = f(K_\delta); \quad K_\delta = \frac{K_3 - K_1}{K_2 - K_4} = \frac{h_3 - h_1}{h_2 - h_4}; \quad (2.4)$$

$$v = \sqrt{\frac{2\rho_{\text{ж}}(h_2 - h_4)}{\rho_{\text{г}}(K_2 - K_4)}}; \quad (2.5)$$

$$p = p_{\text{ст}} - p_{\text{атм}} = \rho_{\text{ж}} \left(h_2 - K_2 \frac{h_2 - h_4}{K_2 - K_4} \right), \quad (2.6)$$

де $p_{\text{атм}}$ – атмосферний тиск, Па; $\rho_{\text{ж}}$ – густина рідини в мікроманометрі ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ $\rho_{\text{ж}}=790$ кг/м³ за умов проведення експериментальних досліджень у лабораторних умовах $T=293$ К, $p=101,3 \cdot 10^3$ Па), кг/м³; h_i – висоти стовпчиків рідини у трубках відповідних мікроманометрів, м; K_i – тарувальні коефіцієнти, що визначаються під час тарування зонда на спеціальній установці з відомими напрямком і значенням швидкості та тиску з побудуванням тарувальних залежностей $K_i=f(\delta)$.



Рис. 2.8. 5- канальний аеродинамічний зонд з нумерацією отворів кульки.

При значних кутах δ для визначення швидкості v , м/с, можливе за таким виразом [110]:

$$v = \sqrt{\frac{2\rho_{\text{ж}}(h_3 - h_1)}{\rho_{\text{г}}(K_3 - K_1)}}. \quad (2.7)$$

За наявності розходжень значень, розрахованих за залежностями (2.5) та (2.7), при умові похибки 2-3%, швидкість потрібно розраховувати як середньо-арифметичну отриманих вищезазначених залежностей.

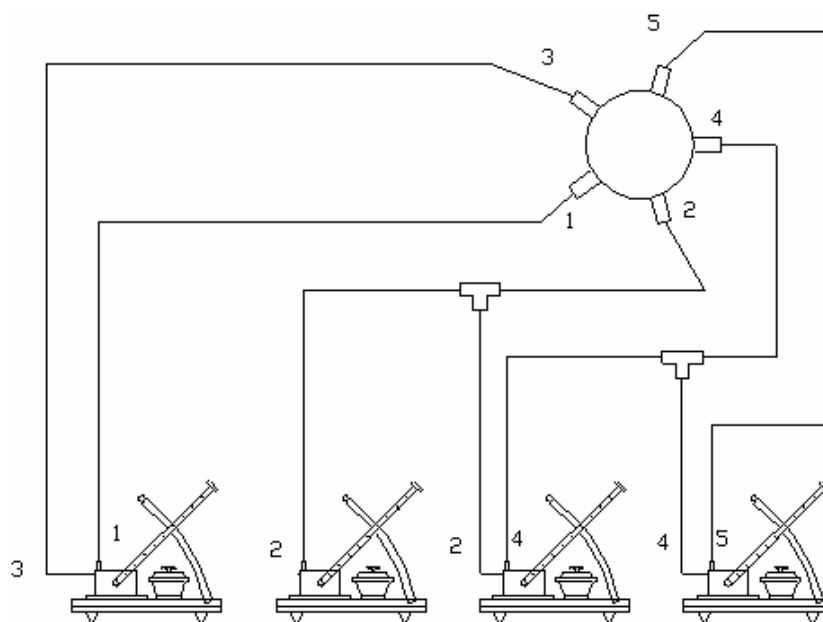


Рис. 2.9. Схема вимірювання гідродинамічних характеристик вихрового шару за допомогою зонда.

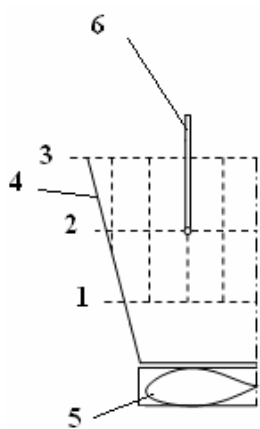


Рис. 2.10. Схема зондування вихрового гранулятора: 1, 2 - проміжні перерізи; 3 - вихідний переріз; 4 - робочий об'єм пристрою; 5 - завихрувач; 6 - кульовий п'ятиканальний зонд.

Якщо початок координат розмістити так, що вісь y буде направлена вздовж осі державки, вісь z — перпендикулярно до площини перерізу досліджень, а x — перпендикулярно до площини yz , то визначення проєкцій вектора швидкості на ці вісі координат проводиться за залежностями

$$\begin{cases} v_x = v \cos \delta \sin \varphi; \\ v_y = v \sin \delta; \\ v_z = v \cos \delta \cos \varphi. \end{cases} \quad (2.8)$$

Розрахунок за залежностями (2.4)-(2.7) виконувався за допомогою ЕОМ зі створенням бази даних з метою подальшого аналізу та обробки.

Замір всіх гідродинамічних параметрів проводився 3-5 разів для кожної з характерних точок.

2.4.3. Візуалізація потоків у вихровому грануляторі

За результатами експерименту для аналізу гідродинаміки робочого простору вихрового гранулятора отримано високоякісні відео- та фотоматеріали, які ілюструють характер розподілу гранул у робочому об'ємі стендів №№1,2 залежно від типу газорозподільного пристрою та співвідношення потоків газової фази.

Запропоновано двоступеневий контроль зміни технологічних характеристик однофазного і двофазного вісесиметричних потоків у межах робочої порожнини пристрою з використанням стандартних засобів контролювання параметрів процесу (швидкість руху, витрата, тиск та ін.) і технологій сучасних цифрових засобів візуального спостереження за перебігом процесу гранулоутворення, що дозволило не тільки кількісно, а й якісно оцінити вплив зміни технологічних та конструктивних характеристик на показники функціонування вихрового псевдозрідженого шару в процесі проведення експерименту. Візуалізація результатів дослідження в такому разі стає більш повною та вичерпною. Це стає основою подальшого всебічного глибокого аналізу проблеми, що розглядається в даній роботі.

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

Визначення похибки вимірів та результатів розрахунку основних гідродинамічних характеристик взаємодіючих потоків у робочій зоні експериментального зразка вихрового гранулятора базується на загальноприйнятих методиках та рекомендаціях [111, 113] щодо проведення інженерного експерименту та обробки отриманих даних.

Для визначення оптимальної кількості дослідів та досягнення найвищого ступеня точності й достовірності отриманих результатів, а також обробки цих результатів використано методи математичної статистики [114, 115].

У ході проведення експерименту можливе виникнення двох родів помилок – випадкової та систематичної [113]

Випадкова помилка зменшує точність результатів експерименту. Аналіз такого роду помилки можливий за умов використання середньоквадратичного відхилення σ , що обчислюється за такою формулою [113]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}}, \quad (2.9)$$

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

Найбільша можлива помилка окремого виміру визначається за правилом трьох сигм [113, 116]

$$\Delta = 3\sigma. \quad (2.10)$$

Двосторонній довірчий інтервал середнього арифметичного значення ε визначали за залежністю [113] за умови ймовірності його потрапляння в довірчий інтервал 95%

$$\varepsilon = t_p \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2.11)$$

де t_p – критерій Стьюдента [113, 114].

Середньоквадратича похибка непрямих вимірів [114]

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x} \cdot \Delta \cdot x_i \right)^2}. \quad (2.12)$$

де $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Точність отриманих рівнянь регресії визначена за методикою найменших квадратів [113].

Систематична помилка зміщає однаковою мірою всі показники величин, які контролюються в ході проведення експерименту. Для виключення помилки такого роду всі прилади, що використані в ході дослідження, пройшли тарування за допомогою зразкових приладів в умовах проходження експерименту. Зв'язок приладів вимірювання з приладами на щиті контролю забезпечено з максимальною похибкою обробки сигналів у межах 1,5%.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНИЙ ОПИС РОБОТИ ГРАНУЛЯЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ ІЗ ЗНИЖЕНОЮ ВИСОТОЮ ЗОНИ ГРАНУЛОУТВОРЕННЯ

3.1. Вибір шляхів інтенсифікації гідродинамічних показників роботи малогабаритних апаратів

Аналіз методів організації руху та гідродинамічних характеристик роботи існуючого грануляційного обладнання (розділ 1) виявив необхідність створення апарата, що має поєднувати основні переваги розглянутих способів та максимально усунути недоліки існуючих конструкцій грануляційного устаткування, з подальшим розробленням методики його розрахунку. Розроблена методика розрахунку повинна враховувати такі умови [102]:

- поліпшення гідродинамічних та термодинамічних умов перебігу процесу гранулоутворення (інтенсивність);
- об'єднання в межах робочого об'єму деяких технологічних стадій у більш крупні (універсальність);
- зведення до мінімуму втрат ресурсів у процесі роботи, можливість вторинного використання нетоварної продукції (ресурсозбереження);
- зменшення забруднення навколишнього середовища відходами виробництва (екологічність);
- мінімальні розміри обладнання.

Запропоновані до розгляду методи підвищення якості процесу гранулоутворення та кінцевого продукту відповідають основним сучасним напрямкам та методам інтенсифікації тепломасообмінних процесів та обладнання [117].

Вирішення питання розроблення методики розрахунку малогабаритних апаратів передбачає розгляд нижченаведених характеристик:

- форма апарата;

- характер створення зваженого шару;
- характер розпилу розплаву;
- особливості циркуляції технологічних потоків.

Середній час перебування гранули нітрату амонію в типовій грануляційній вежі ($d=12-16$ м, $H=30-35$ м) становить $\tau=3-12$ с в залежності від її розміру. З метою зменшення висоти грануляційної вежі встановлюються охолоджувачі киплячого шару. Результати досліджень [1, 2] довели можливість зниження висоти грануляційної вежі приблизно на 5 метрів за рахунок покращання умов розпилу. Розрахунки за залежностями [118] в загальному випадку визначають період кристалізації гранули в межах $\tau=2-5$ с. В порівнянні з грануляторами зваженого шару розміри грануляційної вежі значно більші. Для апаратів зваженого шару час перебування гранули нітрату амонію визначається за критеріальною залежністю [8, 56] та становить $\tau=180-360$ с. Доведено [119], що в вихрових апаратах збільшується час обробки продукту, який може досягати значення $\tau=600$ с з одночасним зменшенням об'єму робочого простору.

Стає можливим зменшення габаритних розмірів обладнання за рахунок правильного підбору форми робочого простору. Дослідження [120] довели доцільність використання апаратів конічної форми в технології баштового гранулювання, що обумовлено можливістю зміни величини швидкості газового потоку за висотою робочого простору та класифікації гранул за розмірами.

Істотною перевагою апаратів конічної форми є можливість обробки твердої фази, досить неоднорідної за гранулометричним складом, оскільки для зрідження великих частинок іноді необхідні значні робочі швидкості, що набагато перевищують швидкості витання дрібних частинок [56]. В апаратах конічної форми великі частинки, унаслідок сепарації, потрапляють переважно в нижню частину шару з високою лінійною швидкістю газу, а дрібні частинки зосереджуються в верхній частині шару, де лінійні швидкості газу нижчі. Розчин

(розплав) надходить у верхню частину конуса і під дією сили тяжіння у висхідному газовому потоці опускається вниз конуса.

Верхній діаметр конуса повинен мати таке значення, щоб забезпечити стійкість гранули в газовому потоці. При цьому значення критерію Вебера у верхньому перерізі конуса робочого об'єму має бути меншим критичного $We < 12$ [8], що забезпечить зосередження гранул певного розміру та відсутність процесу вторинного дроблення краплі:

$$w_{кр} = \sqrt{\frac{We \cdot \sigma}{d_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma}}} \quad (3.1)$$

У нижньому перерізі конуса швидкість повітряного потоку повинна забезпечити витання гранули заданого розміру

$$w_{В} = \frac{Re_{вит} \cdot \mu}{d_{\Gamma} \cdot \rho_{П}}, \quad (3.2)$$

$$Re_{вит} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}} \quad (3.3)$$

В той же час зниження висоти грануляційної вежі за рахунок переходу до конічної форми корпусу не дозволяє значно знизити витрати на виготовлення, обслуговування і ремонт цього типу обладнання в умовах малотонажного виробництва.

Інтенсифікація тепломасообміну в процесі гранулоутворення в киплячому шарі частинок може бути досягнута шляхом збільшення відносної швидкості частинок у газовому потоці. Найбільш простий та радикальний спосіб збільшення відносної швидкості руху частинок в газі – використання відцентрової сили, що виникає під час руху газу по криволінійній траєкторії і визначається

геометрією робочого простору апарата, розмірами та масою частинок та може бути обчислена за такою залежністю [121]

$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot r . \quad (3.4)$$

Закручування газового потоку усередині корпусу апарата дозволяє підвищити стабільність псевдозрідженого шару такого апарата порівняно із звичайним апаратом псевдозрідженого шару. Це відбувається за рахунок того, що на частинки, які перебувають у зваженому стані, діє поле відцентрових сил, що призводить до зменшення впливу чинників, які дестабілізують псевдозріджений шар (локальні перепади тиску, локальна зміна порізності шару, створення повітряних пробок і т.п.) [122].

Дрібні гранули під дією потоку газу рухаються в робочому об'ємі пристрою вгору по спіралеподібній траєкторії за рахунок переваги осьової складової швидкості над коловою. Перетинання потоків гранул різної фракції запобігається за рахунок придбання гранулами відцентрового прискорення, при якому дрібна фракція набуває траєкторії, відмінної від траєкторії великих гранул за рахунок різниці мас; одночасно з цієї самої причини дрібні та великі гранули розподіляються по горизонтальним перерізам пристрою, що також запобігає перетин потоків гранул різної фракції між собою. Крім того, за рахунок місцевого зменшення осьової швидкості потоку газу створюються додаткові умови для високопродуктивного процесу класифікації гранул за розмірами.

Застосування закрученого газового потоку повітря має ще одну перевагу – порівняно із способом отримання гранул у грануляційних вежах застосування апаратів з вихровим псевдозрідженим шаром дозволяє одержати гранули продукту з достатніми гігроскопічними і механічними властивостями без застосування спеціальних кондиціонуючих домішок за рахунок розвинутої гідродинаміки, адже механізм дії цих домішок у боротьбі зі злежуванням гра-

нульованого продукту поки що остаточно не вивчений [4]. Важливо також, що при застосуванні апаратів вихрового киплячого шару з'являється можливість отримання більших та міцніших гранул.

Актуальним питанням, яке вимагає більш глибокого вивчення, є проблема впливу конструкції газорозподільного вузла на характер закручування газового потоку та переміщення гранул у робочому просторі гранулятора, адже гідродинаміка газового потоку в робочому об'ємі вихрового гранулятора великою мірою залежить саме від способу організації руху потоку газу і є визначальною характеристикою, що позначається на проходженні процесів тепломасопередачі в апараті-грануляторі.

Питання оптимального підбору розпилювача рідкого матеріалу стає важливим з огляду на тенденцію створення малогабаритних апаратів високої питомої потужності. Запропоновані конструкції розпилювачів [123] мають низьке значення коефіцієнта корисної дії розпилю. Дослідження [124] довели ефективність розпилення рідкого матеріалу з накладанням на нього упорядкованих коливань з огляду на можливість отримання монодисперсного складу гранул та підвищення значення коефіцієнту корисної дії розпилю. Більш глибоке вивчення процесу вібраційного розпилення [125] повною мірою підтвердило доцільність використання такого способу розпилення в багатотоннажних виробництвах гранульованих продуктів.

Розпил рідкого матеріалу з наданням йому електромагнітних коливань у поєднанні з особливостями проведення процесу гранулоутворення у вихровому газовому потоці дозволяє запобігти утворенню гранул з формою, відмінною від сферичної, значно зменшує вплив зустрічного вихрового вісесиметричного потоку теплоносія на процес формоутворення частинки, яка витікає з розпилювача, знижує вірогідність забруднення розпилювача і частоту його очищення в 3-5 разів, зменшує кількість зіткнень окремих крапель розплаву в 2-3 рази, повністю виключає фактор впливу на розпил нерівномірність надходження до розпилювача рідкого матеріалу, що ефективніше, ніж розпил при переході частини моменту кількості руху від фази, яка здійснює розпил, до рідкого

матеріалу та розпил без надання рідкому матеріалу додаткових коливань, і забезпечує більш ефективне зрошення рідкого матеріалу на вихровий псевдозріджений шар гранул в робочому об'ємі пристрою, підвищує швидкість росту гранул до товарної фракції, що забезпечує збільшення ступеня монодисперсності отриманого гранулометричного складу готового продукту [96].

Стає можливим удосконалення процесу гранулоутворення за рахунок максимального використання всього об'єму вихрового гранулятора з метою створення додаткових зон, що сприяють покращанню якості готового продукту та зменшують розміри апарата [97].

Як параметри, за допомогою яких відбувається підвищення ефективності вихрового гранулятора, запропоновано [98]:

- створення зони внутрішньої циркуляції ретура;
- створення зони додаткового контакту гранул з потоком теплоносія.

Створення міжкільцевого простору для внутрішньої циркуляції ретура дозволяє додатково класифікувати гранули за фракціями та запобігти зменшенню ступеня монодисперсності готового продукту за рахунок розділення потоків товарної та проміжної фракцій та ізолювання їх в окремі потоки.

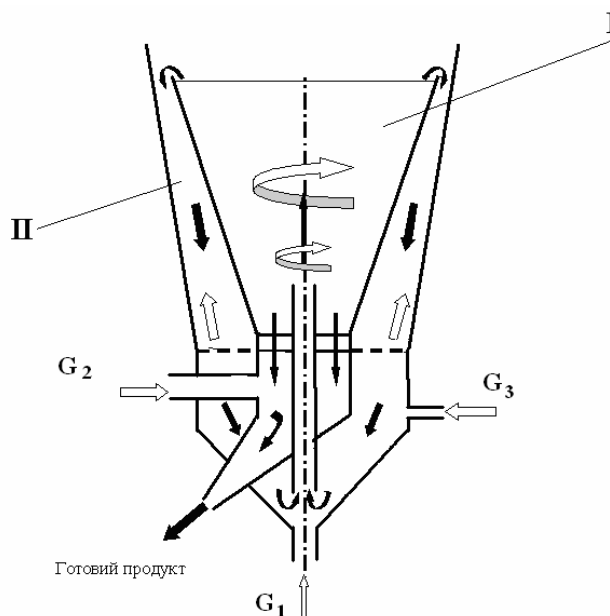


Рис. 3.1. Характер руху матеріальних потоків у робочому просторі апарата:

I – зона гранулювання; II – зона вторинного контакту.

Проведення процесу гранулювання із зоною вторинного контакту гранул дрібної фракції з потоком теплоносія (рис. 3.1) дозволяє розподілити потоки гранул різного фракційного складу в межах одного пристрою для максимально повного завершення процесу кристалізації, запобігає утворенню гранул з формою, відмінною від сферичної, майже повністю виключає фактор впливу на процес гранулоутворення перемішування дрібної і товарної фракцій, підвищує швидкість росту гранул до товарної фракції, що забезпечує збільшення ступеня монодисперсності отриманого гранулометричного складу готового продукту. Формування завершеної кристалічної структури гранули відбувається за рахунок збільшення часу контакту останньої з потоком теплоносія; внаслідок дії висхідного потоку теплоносія у зоні вторинного контакту час перетину міжкорпусної кільцевої порожнини пристрою окремою гранулою зростає, що сприяє повному завершенню процесу кристалізації на поверхні гранули до повернення у першу основну зону, де відбувається розпилення рідкого матеріалу. При цьому зменшується вплив дестабілізуючих факторів, які викликані неоднорідністю розмірів та форми гранул.

Основні переваги застосування апаратів такого типу в модернізованих технологічних схемах баштового гранулювання та нових схемах безбаштового виробництва гранульованих продуктів [102]:

- одночасне проходження процесів глибокого упарювання розчинів, кристалізації, гранулювання і сушіння в межах одного пристрою;
- відсутність потреби в обладнанні для розсіювання продукту та повернення нетоварної фракції до процесу;
- довговічність апарата, відсутність проблем з інкрустацією робочих поверхонь;
- економічні аспекти (матеріаломісткість, енергоємність, витрати на виробництво, монтаж, ремонт та обслуговування).

Результати математичного моделювання та експериментальних досліджень повинні довести вплив форми апарата та особливостей гідродинаміки на зменшення габаритів апарата та збільшення часу перебування гранули в апараті.

3.2 Розроблення фізичної моделі руху гранул

Гідродинамічні параметри потоку теплоносія чинять істотний вплив на гідродинаміку гранул у вихровому грануляторі, а, у свою чергу від, неї залежать такі параметри процесу грануляції, як розмір гранул, гранулометричний склад, заповнення гранулами робочого об'єму та ін. Таким чином, за допомогою зміни параметрів потоку теплоносія можна впливати на гідродинаміку гранул та досягти сприятливих умов проведення процесу грануляції у вихровому грануляторі, що дасть можливість отримувати гранульований продукт з високим ступенем монодисперсності.

Теоретичний опис гідродинаміки гранул у вихровому потоці теплоносія дає можливість визначити основні гідродинамічні показники класу малогабаритних апаратів з вихровим потоком теплоносія.

Основними чинниками, що впливають на течію в прямовісному дифузори, є геометричні параметри (кут розкриття α , ступінь розширення n), режим течії (ламінальний, турбулентний) і умови на вході (форма епюри швидкості, інтенсивність закручування потоку).

Для створення математичної моделі опису руху крапель та гранул розглянемо фізичні особливості руху матеріальних потоків та взаємодії фаз в робочому просторі апарата (рис. 3.2) [98, 120-122].

У пристрій подається теплоносій G_2 , який надходить до вихрового газорозподільного вузла. При його проходженні теплоносій закручується навколо вертикальної осі пристрою і набуває спіралеподібного руху. Вихровий вісесиметричний потік теплоносія переміщується вгору по простору додаткового конуса назустріч матеріалу. Одночасно з цим до утвореного спіралеподібного потоку теплоносія підводять розплав.

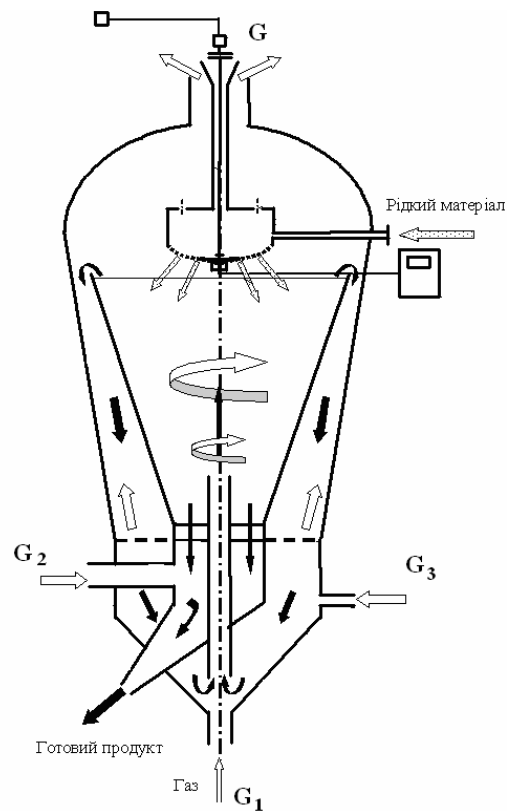


Рис. 3.2. Схема руху вихрових потоків у вихровому грануляторі ($G=G_1+G_2+G_3$).

Під дією електромагнітних коливань струмів розплаву, що витікає крізь отвори, розпадається на окремі гранули сферичної форми. Утворені гранули, контактуючи з вісесиметричним вихровим потоком теплоносія, охолоджуються, кристалізуються і потрапляють на внутрішню поверхню додаткового конуса. Залежно від отриманого розміру гранули класифікуються на велику та дрібну фракції за рахунок зміни колової й осьової складових швидкості вісесиметричного вихрового потоку теплоносія по висоті додаткового конуса. Гранули дрібної фракції підхоплюються створеним у додатковому конусі вісесиметричним вихровим потоком теплоносія, переміщуються до верхнього перетину додаткового конуса і відводяться з робочого об'єму пристрою через міжкорпусну кільцеву порожнину між додатковим конусом і основним вертикальним корпусом. В міжкорпусній кільцевій порожнині гранули дрібної фракції починають вторинно контактувати з потоком теплоносія G_3 . В результаті контакту з потоком теплоносія в межах міжкорпусної кільцевої порожнини дрібні гранули додатково висушуються, кристалізуються та охолоджуються. У дніщі основного вертикального кор-

пусу ці гранули потрапляють у зону розрідження, засмоктуються струменем газу G_1 і викидаються у центральну частину робочого простору додаткового конуса у ядро вихрового псевдозрідженого шару. Розплав, який потрапляє на поверхню дрібних гранул, кристалізується, при цьому розмір гранул збільшується. Велика фракція не залишає робочий об'єм пристрою й у міру дорошування та збільшення гранули, циркулюючи об'ємом додаткового конуса, переміщуються вниз по його перерізу. При досягненні заданого розміру гранули падають униз по поверхні додаткового конуса, проходять через вихровий газорозподільний вузол і відводяться з пристрою. Відпрацьований теплоносій G виводиться з основного вертикального корпусу через патрубок у еліптичній кришці.

Головна особливість розробленого високоефективного гранулятора - поєднання процесу створення гранульованого продукту з процесами висушування без додаткового обладнання в межах одного пристрою та створення умов для отримання гранул сферичної форми з високим ступенем монодисперсності.

3.3. Математичний опис гідродинаміки закручених потоків у робочому просторі вихрового гранулятора

3.3.1. Опис руху газового потоку у вихровому грануляторі

Незважаючи на достатньо широке застосування обладнання з використанням закручених потоків фаз [126], а також на значну кількість теоретичних експериментальних досліджень [127-136], існує ряд питань щодо руху взаємодіючих фаз, які не мають досить строгого математичного опису та повною мірою обґрунтованого вирішення. В цілому є підстави вважати задачу визначення полів швидкостей у закрученому турбулентному потоці в конічних каналах при довільному законі розподілу складових повної швидкості не вирішеною на даний час у загальному вигляді [137].

Для найбільш повного математичного опису руху потоків у робочому просторі вихрового гранулятора необхідно обрати максимально ефективний

підхід, що дозволить з урахуванням конкретного завдання провести всебічний аналіз гідродинамічних властивостей процесу гранулювання у вихровому потоці теплоносія. Сучасні методики не передбачають єдиного підходу до вирішення завдань такого типу, узагальнюючи окремі класи апаратів у великі групи та надаючи загальні рішення. Крім того, питання опису властивостей вихрового псевдозрідженого шару в апаратах зі змінним перерізом робочої камери стосовно до процесу гранулювання до цього часу не розглянуто повною мірою [103, 138].

Для вивчення характеру проходження технологічного процесу гранулювання у вихровому шарі необхідно насамперед визначити поля швидкостей газової фази, адже ці характеристики мають велике значення для проведення процесу та визначення оптимальної комбінації технологічних та конструктивних параметрів.

У загальному випадку для розрахунку гідродинамічних характеристик закрученого потоку використовуються методики, які базуються на рівняннях руху ідеальної або в'язкої рідини і (або) експериментальних даних [139-141]. Саме цей шлях є найбільш доцільним для розв'язання конкретної задачі руху фаз у вихровому грануляторі.

Для вирішення рівняння Нав'є-Стокса стосовно конкретної задачі вихрового руху потоку газу в робочому просторі зі змінною площею поперечного перерізу необхідно раціонально підібрати систему координат для можливості проведення спрощень стосовно до процесу, що розглядається. Оптимальним варіантом вибору системи координат є циліндрична система координат [142].

Основні спрощення, що отримані на основі теоретичних та експериментальних наукових праць та прийняті для вирішення поставленої задачі [143]:

- характер течії газу вісесиметричний;
- рух газу в апараті прийнято усталеним;
- для конкретного випадку задані закон зміни витратної складової швидкості та тиску вздовж окремих осей координат.

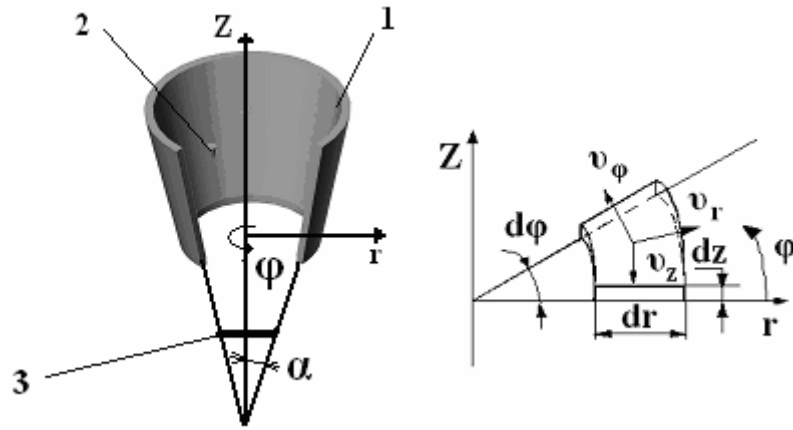


Рис. 3.3. Схема елементарного об'єму газу в циліндричній системі координат (r, φ, z) : 1 – робочий простір пристрою; 2 – елементарний об'єм газу; 3 – газорозподільвач; $dr, d\varphi, dz$ – елементарні прирости за відповідними координатними осями; V_r, V_φ, V_z – радіальна, колова й осьова (витратна) складові швидкості руху газу відповідно; α – половина кута розкриття дифузора.

Запишемо рівняння Нав'є-Стокса для випадку руху реального газового потоку в дифузори (рис. 2.3), доповнюючи його рівнянням нерозривності потоку [142], та проаналізуємо складові системи цих рівнянь, виходячи з прийнятих вище спрощень та передумов:

$$\left. \begin{aligned}
 & \frac{\partial V_r}{\partial \tau} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\varphi^2}{r} = \\
 & = F_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + E \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{V_r}{r^2} \right); \\
 & \frac{\partial V_\varphi}{\partial \tau} + V_r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} - \frac{V_r V_\varphi}{r} = \\
 & = F_\varphi - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + E \left(\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} - \frac{V_\varphi}{r^2} \right); \\
 & \frac{\partial V_z}{\partial \tau} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = \\
 & = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + E \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} \right)
 \end{aligned} \right\}, \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{V_r}{r} = 0, \quad (3.6)$$

або

$$\left. \begin{aligned} H_{V_r} - \frac{V_\varphi^2}{r} &= F_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + E \left(\Delta v_r - \frac{V_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} \right); \\ H_{V_\varphi} + \frac{V_r V_\varphi}{r} &= F_\varphi + E \left(\Delta V_\varphi - \frac{V_\varphi}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} \right); \\ H_{V_z} &= F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + E \Delta V_z. \end{aligned} \right\}, \quad (3.7)$$

де E – коефіцієнт турбулентної в'язкості відповідно до гіпотези Бусінеска [126].

Диференціальні оператори обчислюються за залежностями [144]

$$H = \frac{\partial}{\partial t} + V_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial}{\partial z},$$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (3.8)$$

З урахуванням вісесиметричності руху газу в робочій порожнині вихрового гранулятора

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0. \quad (3.9)$$

Зважаючи на усталений рух газу в апараті

$$\frac{\partial V_r}{\partial \tau} = 0; \quad \frac{\partial V_\varphi}{\partial \tau} = 0; \quad \frac{\partial V_z}{\partial \tau} = 0. \quad (3.10)$$

Дією масових сил у випадку руху елементарного об'єму газового потоку, що розглядається, можна знехтувати [142], тобто

$$\sum F_r = 0; \quad \sum F_\varphi = 0; \quad \sum F_z = 0. \quad (3.11)$$

Отже, система рівнянь (3.5) та рівняння нерозривності (3.6) набирають вигляду з урахуванням зменшення величини V_z уздовж осі z

$$\left. \begin{aligned} V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\varphi^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + E \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} \right); \\ V_r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} - \frac{V_r V_\varphi}{r} &= E \left(\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{V_\varphi}{r^2} \right); \\ V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + E \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} \right). \end{aligned} \right\} (3.12)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{V_r}{r} = 0. \quad (3.13)$$

Для стаціонарної течії в трубі круглого перерізу зберігається витрата газу

$$Q = 2\pi \int_0^{\alpha} r V_z dr. \quad (3.14)$$

З допущення щодо постійності витратної складової швидкості вздовж r , маємо

$$V_z = \frac{Q}{S}. \quad (3.15)$$

Площа перерізу круглої форми

$$S = \pi R^2. \quad (3.16)$$

Зіставлення (3.15) та (6.16) дає

$$V_z = \frac{Q}{\pi R^2}. \quad (3.17)$$

Для конічного робочого простору вихрового гранулятора залежність радіуса твердої стінки від висоти має вигляд

$$R = f(z) = \operatorname{tg} \alpha \cdot z. \quad (3.18)$$

Підставивши (3.18) в (3.17), отримуємо

$$V_z(z) = \frac{Q}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot z^2}. \quad (3.19)$$

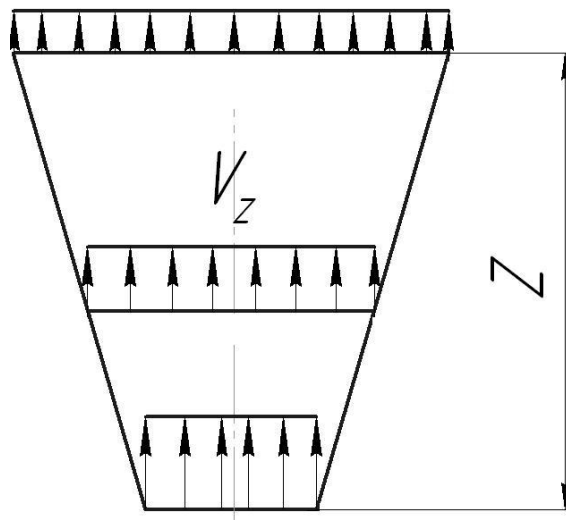


Рис. 3.4. Характер розподілу витратної складової швидкості газового потоку за висотою пристрою.

Аналіз рис. 3.4 та рівняння (3.19) демонструє зменшення витратної складової швидкості газового потоку за висотою пристрою внаслідок збільшення площі поперечного перерізу робочого простору з висотою при збереженні постійності витрати газового потоку.

Похідна (3.19) за z

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{Q}{\pi \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot z^2} \right) = -2 \frac{Q}{\pi \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot z^3}. \quad (3.20)$$

Тоді рівняння нерозривності потоку (3.13) має вигляд

$$\left(\frac{\partial}{\partial r} V_r(z, r) \right) + \frac{2 \cdot Q}{\pi \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot z^3} + \frac{V_r(z, r)}{r} = 0. \quad (3.21)$$

Вирішуємо (3.21) щодо V_r

$$V_r(z, r) = \frac{-\frac{Q \cdot r^2}{\pi \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot z^3} + F_1(z)}{r}, \quad (3.22)$$

де значення $F_1(z)$ визначається за початкових умов $v_r(z, r) = 0$ при $R = \operatorname{tg} \varphi \cdot z$:

$$F_1(z) = \frac{Q}{z \cdot \pi}. \quad (3.23)$$

Після підстановки (3.23) рівняння (3.22) має вигляд

$$V_{r1}(z, r) = \frac{-\frac{Q \cdot r^2}{\pi \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot z^3} + \frac{Q}{z \cdot \pi}}{r}. \quad (3.24)$$

Припускаємо, що упродовж радіуса колова швидкість змінюється за квадратичною залежністю, а упродовж осі – за лінійною залежністю. Припущення про характер зміни колової швидкості спирається на результати досліджень вихрових вісесиметричних потоків [126, 141, 145, 146]. Крім того, при $r=0$ та $z=0$ значення $V_\varphi=0$, тобто вільний член загального рівняння другого ступеня дорівнює 0. Шукаємо розв'язок у вигляді

$$V_\varphi(z,r) = Ar^2 + Bzr + Cr + Fz. \quad (3.25)$$

Для розв'язання рівняння системи (3.12) потрібні вирази

$$\frac{\partial}{\partial r}(Ar^2 + Bzr + Cr + Fz) = 2Ar + Bz + C, \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2}(Ar^2 + Bzr + Cr + Fz) = 2A, \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2}(Ar^2 + Bzr + Cr + Fz) = 0. \quad (3.28)$$

Тоді перше рівняння системи (3.12) набере вигляду

$$\begin{aligned} & \frac{\left(-\frac{Q \cdot r^2}{\pi \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot z^3} + \frac{Q}{z \cdot \pi}\right) \cdot (2Ar + Bz + C)}{r} - \frac{2 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha^4 \cdot z^5} + \\ & + \frac{\left(-\frac{Q \cdot r^2}{\pi \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot z^3} + \frac{Q}{z \cdot \pi}\right) \cdot (Ar^2 + Bzr + Cr + Fz)}{r^2} = \\ & = E \left(2A + \frac{2Ar + Bz + C}{r} - \frac{Ar^2 + Bzr + Cr + Fz}{r^2} \right). \end{aligned} \quad (3.29)$$

Значення А, В, С і F отримуємо з урахуванням таких граничних умов: на стінці конуса $V_{\varphi}=0$; на половині радіуса завихрювача $V_{\varphi}=V_{\varphi 1}$; у центрі конуса $V_{\varphi}=0$.

Отримуємо систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned} & \left(-\frac{Q \cdot r^2}{\pi \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot z^3} + \frac{Q}{z \cdot \pi} \right) \cdot (2Ar + Bz + C) - \frac{2 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha^4 \cdot z^5} \\ & + \frac{\left(-\frac{Q \cdot r^2}{\pi \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot z^3} + \frac{Q}{z \cdot \pi} \right) \cdot (Ar^2 + Bzr + Cr + Fz)}{r^2} - \\ & E \left(2A + \frac{2Ar + Bz + C}{r} - \frac{Ar^2 + Bzr + Cr + Fz}{r^2} \right) = 0; \\ & Az^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 + Bz^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha + Cz \cdot \operatorname{tg} \alpha + Fz = 0; \\ & Fz = 0; \\ & V_{\varphi 1} = \frac{1}{4} A_1 z^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 + \frac{1}{2} B_1 z^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha + \frac{1}{2} C_1 z \cdot \operatorname{tg} \alpha + F_1 z. \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

Розв'язання системи (3.30) щодо А, В, С і F має вигляд

$$\left. \begin{aligned} & F=0; \\ & B = -(4V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^3 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot r^2 - 6V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^4 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot r + 4V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^5 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \alpha^3 + \\ & + 6V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^2 \cdot Q \cdot r^3 + 6V_{\varphi 1} \cdot \pi^2 \cdot z^5 \cdot E \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot r + Q^2 \cdot rz_1^2 - 2Q^2 \cdot rz^2) / \\ & / (\operatorname{tg} \alpha \cdot \pi \cdot z^2 (2z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot z \cdot Q \cdot r^2 + \\ & + 3z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot z^2 \cdot Q \cdot r - 2z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha^3 \cdot z^3 \cdot Q - 3z_1^2 \cdot Q \cdot r^3 - 3z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot \pi \cdot z^3 \cdot E \cdot r - 2z^5 \cdot \operatorname{tg} \alpha^3 \cdot Q - \\ & - 3z^4 \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot Q \cdot r + 2z^5 \cdot \operatorname{tg} \alpha^3 \cdot Q + 3z^2 \cdot Q \cdot r^3 + 3z^5 \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot \pi \cdot E \cdot r)); \\ & A = \frac{2Q^2 \cdot r}{\operatorname{tg} \alpha^2 \cdot \pi \cdot z^2 (-2Q \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot z \cdot r - 3Q \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot z^2 \cdot r + 2Q \cdot \operatorname{tg} \alpha^3 \cdot z^3 + 3Q \cdot r^3 + 3E \cdot \pi \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot z^3 \cdot r)}; \\ & C = (4V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^5 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \alpha^3 + 6V_{\varphi 1} \cdot \pi^2 \cdot z^5 \cdot E \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot r - 6V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^4 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot r - \\ & - 4V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^3 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot r^2 + 6V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^2 \cdot Q \cdot r^3 - Q^2 \cdot rz_1^2) / (\operatorname{tg} \alpha \cdot \pi \cdot z (2z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot z \cdot Q \cdot r^2 + \\ & + 3z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot z^2 \cdot Q \cdot r - 2z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha^3 \cdot z^3 \cdot Q - 3z_1^2 \cdot Q \cdot r^3 - 3z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot \pi \cdot z^3 \cdot E \cdot r - \\ & - 2z^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot Q \cdot r^2 - 3z^4 \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot Q \cdot r + 2z^5 \cdot \operatorname{tg} \alpha^3 \cdot Q + 3z^2 \cdot Q \cdot r^3 + 3z^5 \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot \pi \cdot E \cdot r)) \end{aligned} \right\} \quad (3.31)$$

Вираз для обчислення значення колової швидкості у такому разі має вигляд

$$\begin{aligned}
 V_{\varphi}(z,r) = & \frac{2Q^2 \cdot r^3}{\pi \cdot \text{tg}\alpha^2 \cdot z^2 (-2Q \cdot \text{tg}\alpha \cdot z \cdot r^2 - 3Q \cdot \text{tg}\alpha^2 \cdot z^2 + 2Q \cdot \text{tg}\alpha^3 z^3 + 3Q \cdot r^3 + 3E \cdot \pi \cdot \text{tg}\alpha^2 z^3 r)} - \\
 & - ((-4V_{\varphi} \cdot \pi \cdot z^3 \cdot Q \cdot \text{tg}\alpha \cdot r^2 - 6V_{\varphi} \cdot \pi \cdot z^4 \cdot Q \cdot \text{tg}\alpha^2 \cdot r + 4V_{\varphi} \cdot \pi \cdot z^5 \cdot Q \cdot \text{tg}\alpha^3 + \\
 & + 6V_{\varphi} \cdot \pi \cdot z^2 \cdot Q \cdot r^3 + 6V_{\varphi} \cdot \pi^2 \cdot z^5 \cdot E \cdot \text{tg}\alpha^2 \cdot r + Q^2 \cdot r \cdot z_1^2 - 2Q^2 \cdot r \cdot z^2) r) / \\
 & / (\text{tg}\alpha \cdot \pi \cdot z (2z_1^2 \cdot \text{tg}\alpha \cdot z \cdot Q \cdot r^2 + \\
 & + 3z_1^2 \cdot \text{tg}\alpha^2 \cdot z^2 \cdot Q \cdot r - 2z_1^2 \cdot \text{tg}\alpha^3 \cdot z^3 \cdot Q - 3z_1^2 \cdot Q \cdot r^3 - 3z_1^2 \cdot \text{tg}\alpha^2 \cdot \pi \cdot z^3 \cdot E \cdot r - 2z^5 \cdot \text{tg}\alpha^3 \cdot Q - \\
 & - 3z^4 \cdot \text{tg}\alpha^2 \cdot Q \cdot r + 2z^5 \cdot \text{tg}\alpha^3 \cdot Q + 3z^2 \cdot Q \cdot r^3 + 3z^5 \cdot \text{tg}\alpha^2 \cdot \pi \cdot E \cdot r)) + \\
 & + ((4V_{\varphi} \cdot \pi \cdot z^5 \cdot Q \cdot \text{tg}\alpha^3 + 6V_{\varphi} \cdot \pi^2 \cdot z^5 \cdot E \cdot \text{tg}\alpha^2 \cdot r - 6V_{\varphi} \cdot \pi \cdot z^4 \cdot Q \cdot \text{tg}\alpha^2 \cdot r - \\
 & - 4V_{\varphi} \cdot \pi \cdot z^3 \cdot Q \cdot \text{tg}\alpha \cdot r^2 + 6V_{\varphi} \cdot \pi \cdot z^2 \cdot Q \cdot r^3 - Q^2 \cdot r z_1^2) r) / (\text{tg}\alpha \cdot \pi \cdot z (2z_1^2 \cdot \text{tg}\alpha \cdot z \cdot Q \cdot r^2 + \\
 & + 3z_1^2 \cdot \text{tg}\alpha^2 \cdot z^2 \cdot Q \cdot r - 2z_1^2 \cdot \text{tg}\alpha^3 \cdot z^3 \cdot Q - 3z_1^2 \cdot Q \cdot r^3 - 3z_1^2 \cdot \text{tg}\alpha^2 \cdot \pi \cdot z^3 \cdot E \cdot r - \\
 & - 2z^3 \cdot \text{tg}\alpha \cdot Q \cdot r^2 - \\
 & - 3z^4 \cdot \text{tg}\alpha^2 \cdot Q \cdot r + 2z^5 \cdot \text{tg}\alpha^3 \cdot Q + 3z^2 \cdot Q \cdot r^3 + 3z^5 \cdot \text{tg}\alpha^2 \cdot \pi \cdot E \cdot r)).
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

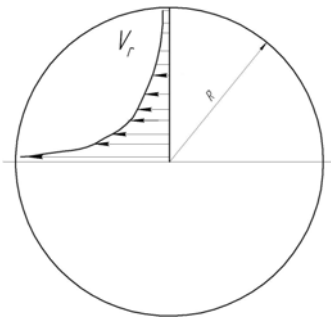


Рис. 3.5. Характер розподілу радіальної складової швидкості газового потоку за радіусом пристрою.

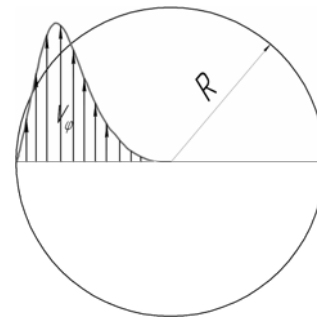


Рис. 3.6. Характер розподілу колової складової швидкості газового потоку за радіусом пристрою.

Аналіз рис. 3.5 та рівняння (3.24) демонструють зменшення радіальної складової швидкості газового потоку за радіусом пристрою у міру наближення до граничної умови, що описується максимальним радіусом перерізу робочого простору апарата за залежністю (3.18). Аналіз рис. 3.6 та рівняння (3.32) демонструє, що колова складова швидкості газового потоку за радіусом пристрою

має екстремум (максимум) з поступовим зменшенням значення максимуму у міру наближення до верхнього перерізу робочого простору апарата.

Похибка отриманого результату при перевірці розрахункових формул пояснюється накопиченням окремих похибок при встановленні допущень та розв'язанні системи рівнянь (3.32) та рівнянь (3.31), (3.24). При підстановці отриманих виразів у друге рівняння системи (3.13) тотожності між правою та лівою частинами рівняння не спостерігається, але в цілому похибка становить до 10 %, що припустимо для розрахунку [113].

3.3.2. Опис руху крапель та гранул

Для моделювання двофазних течій, в яких одна з фаз, що розглядається, представлена у вигляді дисперсних частинок, використовується підхід Лагранжа [147]. На основі цього методу розглядається рух дисперсної фази під дією суцільної фази.

Потік суцільної фази, течія якого у конкретному випадку, що розглядається, моделюється системою рівнянь Нав'є-Стокса (3.13) і рівнянням нерозривності потоку (3.14), віддає частину моменту кількості руху дискретним частинками. У разі появи рідкої фази в робочому об'ємі пристрою вона втягується в обертовий рух за рахунок енергії газового потоку.

Момент кількості руху газової фази за відсутності у робочому об'ємі рідкої фази [148]

$$M_2 = 2 \cdot \pi \cdot \rho_2 \cdot V_\varphi \cdot r^2 dr dz. \quad (3.33)$$

Момент кількості руху газової фази після взаємодії з рідкою фазою в робочому об'ємі [148]

$$M'_2 = 2 \cdot \pi \cdot \rho_2 \cdot V'_\varphi \cdot r^2 dr dz, \quad (3.34)$$

де V'_φ - колова швидкість газового потоку після взаємодії з рідкою фазою.

Момент кількості руху рідкої фази, який набуто після взаємодії з газовим потоком [148]

$$M_p = m_p \cdot W_\varphi \cdot r. \quad (3.35)$$

З урахуванням того що рідина являє собою краплинний потік, рівняння (2.35) матиме вигляд

$$M_p = 2 \cdot \pi \cdot \rho_p \cdot \left(\frac{Q_p}{Q_2} \right) W_\varphi \cdot r^2 dr dz. \quad (3.36)$$

Згідно з [148] запишемо рівність

$$M_2 = M_2' + M_p, \quad (3.37)$$

або

$$\rho_2 \cdot V_\varphi = \rho_2 \cdot V_\varphi' + \rho_p \cdot \left(\frac{Q_p}{Q_2} \right) W_\varphi. \quad (3.38)$$

У цьому разі колова швидкість газового потоку після взаємодії з рідкою фазою

$$V_\varphi' = V_\varphi - \frac{\rho_p}{\rho_2} \cdot \left(\frac{Q_p}{Q_2} \right) W_\varphi. \quad (3.39)$$

Для деякого спрощення математичної моделі вважатимемо, що частинки дисперсної фази мають шароподібну форму, адже в польоті крапля розплаву намагається набути саме цієї форми як найбільш досконалої [143].

Система диференціальних рівнянь руху краплі в циліндричних координатах [149]:

$$\left. \begin{aligned} j_r &= \frac{F_r}{m} = \frac{dW_r}{dt} - \frac{W_\varphi^2}{r}; \\ j_\varphi &= \frac{F_\varphi}{m} = \frac{dW_\varphi}{dt} + \frac{W_r W_\varphi}{r}; \\ j_z &= \frac{F_z}{m} = \frac{dW_z}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (3.40)$$

Рівняння динаміки руху краплі в загальному вигляді

$$m \frac{d\bar{W}}{dt} = \bar{F}_m + \bar{F}_o. \quad (3.41)$$

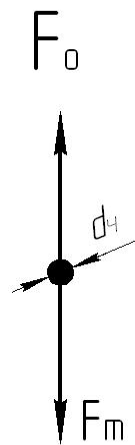


Рис. 3.7. Сили, що діють на краплю у вихровому грануляторі.

Сила тяжіння, що діє на краплю

$$F_m = m \cdot g \quad (3.42)$$

Сила аеродинамічного опору для розвинутого турбулентного руху пропорційна квадрату швидкості

$$F_O = c \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\rho_z \cdot (V - W)^2}{2}. \quad (3.43)$$

Сила аеродинамічного опору отримана з використанням лінійного коефіцієнта опору ψ замість квадратичного з урахуванням критерію Стокса [146]

$$F_O = \frac{3}{4} \cdot \frac{\psi \cdot \mu_z}{\rho_y \cdot d_y} \cdot (V - W). \quad (3.44)$$

Коефіцієнт аеродинамічного опору, що характеризується режимом руху та розміром краплі, визначається відповідно до [147]:

$$\psi = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\text{Re}^{0,33}} - \text{при значенні} & \text{Re} < 1000; \\ 0,44 - \text{при значенні} & \text{Re} \geq 1000. \end{cases} \quad (3.45)$$

Рівняння руху краплі в циліндричних координатах:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dW_r}{d\tau} &= \frac{W_\varphi^2}{r} + \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z}{4 \cdot \rho_y \cdot d_y} (V_r - W_r); \\ \frac{dW_\varphi}{d\tau} &= -\frac{W_r W_\varphi}{r} + \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z}{4 \cdot \rho_y \cdot d_y} (V_\varphi - W_\varphi); \\ \frac{dW_z}{d\tau} &= -g + \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z \cdot \rho_z}{4 \cdot \rho_y \cdot d_y} (V_z - W_z). \end{aligned} \right\} \quad (3.46)$$

Отримана система рівнянь (3.46) має в своєму складі три рівняння та чотири невідомі значення, що необхідно визначити.

Першою похідною по переміщенню за часом є швидкість руху краплі за відповідними напрямками

$$\left. \begin{aligned} \frac{dr}{d\tau} &= W_r; \\ \frac{d\varphi}{d\tau} &= W_\varphi; \\ \frac{dz}{d\tau} &= W_z. \end{aligned} \right\} \quad (3.47)$$

Звідси

$$\left. \begin{aligned} d\tau &= \frac{dr}{W_r}; \\ d\tau &= \frac{d\varphi}{W_\varphi}; \\ d\tau &= \frac{dz}{W_z}. \end{aligned} \right\} \quad (3.48)$$

З урахуванням системи (3.48) система рівнянь (3.46) запишеться у вигляді

$$\left. \begin{aligned} \frac{dW_r}{dr} W_r &= \frac{W_\varphi^2}{r} + \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_2}{4 \cdot \rho_u \cdot d_u} (V_r - W_r); \\ \frac{dW_\varphi}{d\varphi} W_\varphi &= -\frac{W_r W_\varphi}{r} + \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_2}{4 \cdot \rho_u \cdot d_u} (V_\varphi - W_\varphi); \\ \frac{dW_z}{dz} W_z &= -g + \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_2 \cdot \rho_2}{4 \cdot \rho_u \cdot d_u} (V_z - W_z). \end{aligned} \right\} \quad (3.49)$$

Ліва частина другого рівняння системи (3.49) за умов вісесиметричності вихрового потоку дорівнює нулю

$$-\frac{W_r W_\varphi}{r} + \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z \cdot \rho_z}{4 \cdot \rho_u \cdot d_u} (V_\varphi - W_\varphi) = 0. \quad (3.50)$$

Введемо позначення

$$a = \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z}{4 \cdot \rho_u \cdot d_u}. \quad (3.51)$$

Таким чином,

$$-\frac{W_r W_\varphi}{r} + a \cdot (V_\varphi - W_\varphi) = 0. \quad (3.52)$$

Розв'яжемо рівняння (3.52) відносно W_φ :

$$W_\varphi = \frac{a \cdot r \cdot V_\varphi}{a \cdot r + W_r}. \quad (3.53)$$

З урахуванням (3.53) перше рівняння системи (3.49) матиме вигляд

$$\frac{dW_r}{dr} W_r = \frac{\left(\frac{a \cdot r \cdot V_\varphi}{a \cdot r + W_r} \right)^2}{r} + a \cdot (V_r - W_r). \quad (3.54)$$

Рівняння (3.54) дозволяє встановити закономірність зміни радіальної складової швидкості краплі при заданні даних для розрахунку (ψ , μ , ρ_u , d_u , φ , Q , z) та значень радіальної і колової складових швидкості газового потоку, що відомі заздалегідь.

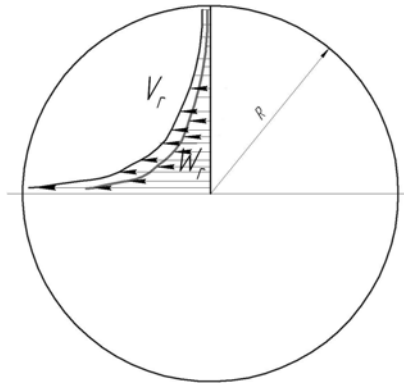


Рис. 3.8. Характер розподілу радіальної швидкості краплі за радіусом пристрою.

Розв'язання рівняння (3.56) при заданні даних для розрахунку (ψ , μ , $\rho_{\text{ч}}$, $d_{\text{ч}}$, V_{ϕ} , ϕ , Q , z) дозволяє визначити характер зміни радіальної складової швидкості краплі залежно від закону, за яким проходить зміна радіальної та колової складових швидкості газового потоку. Стає можливим прогнозувати можливі зміни закону розподілу радіальної складової швидкості краплі при заданні геометрії робочого простору, технологічних параметрів та початкових умов закручення газового потоку.

Після отримання розв'язку рівняння (3.56) в подальшому визначено закон зміни колової швидкості краплі за радіусом пристрою розв'язанням рівняння (3.53):

$$W_{\phi} = \frac{\left[\frac{2Q^2 \cdot r^3}{\pi \cdot \text{tg} \alpha^2 \cdot z^2 (-2Q \cdot \text{tg} \alpha \cdot z \cdot r^2 - 3Q \cdot \text{tg} \alpha^2 \cdot z^2 + 2Q \cdot \text{tg} \alpha^3 z^3 + 3Q \cdot r^3 + 3E \cdot \pi \cdot \text{tg} \alpha^2 z^3 r)} - \right.}{a \cdot r + W_r} \quad (3.57)$$

$$\left. \begin{aligned} & - ((-4V_{\phi 1} \cdot \pi \cdot z^3 \cdot Q \cdot \text{tg} \alpha \cdot r^2 - 6V_{\phi 1} \cdot \pi \cdot z^4 \cdot Q \cdot \text{tg} \alpha^2 \cdot r + 4V_{\phi 1} \cdot \pi \cdot z^5 \cdot Q \cdot \text{tg} \alpha^3 + \\ & + 6V_{\phi 1} \cdot \pi \cdot z^2 \cdot Q \cdot r^3 + 6V_{\phi 1} \cdot \pi^2 \cdot z^5 \cdot E \cdot \text{tg} \alpha^2 \cdot r + Q^2 \cdot r \cdot z_1^2 - 2Q^2 \cdot r \cdot z^2) r) / \\ & / (\text{tg} \alpha \cdot \pi \cdot z (2z_1^2 \cdot \text{tg} \alpha \cdot z \cdot Q \cdot r^2 + \\ & + 3z_1^2 \cdot \text{tg} \alpha^2 \cdot z^2 \cdot Q \cdot r - 2z_1^2 \cdot \text{tg} \alpha^3 \cdot z^3 \cdot Q - 3z_1^2 \cdot Q \cdot r^3 - 3z_1^2 \cdot \text{tg} \alpha^2 \cdot \pi \cdot z^3 \cdot E \cdot r - 2z^5 \cdot \text{tg} \alpha^3 \cdot Q - \\ & - 3z^4 \cdot \text{tg} \alpha^2 \cdot Q \cdot r + 2z^5 \cdot \text{tg} \alpha^3 \cdot Q + 3z^2 \cdot Q \cdot r^3 + 3z^5 \cdot \text{tg} \alpha^2 \cdot \pi \cdot E \cdot r)) + \\ & + ((4V_{\phi 1} \cdot \pi \cdot z^5 \cdot Q \cdot \text{tg} \alpha^3 + 6V_{\phi 1} \cdot \pi^2 \cdot z^5 \cdot E \cdot \text{tg} \alpha^2 \cdot r - 6V_{\phi 1} \cdot \pi \cdot z^4 \cdot Q \cdot \text{tg} \alpha^2 \cdot r - \\ & - 4V_{\phi 1} \cdot \pi \cdot z^3 \cdot Q \cdot \text{tg} \alpha \cdot r^2 + 6V_{\phi 1} \cdot \pi \cdot z^2 \cdot Q \cdot r^3 - Q^2 \cdot r z_1^2) r) / (\text{tg} \alpha \cdot \pi \cdot z (2z_1^2 \cdot \text{tg} \alpha \cdot z \cdot Q \cdot r^2 + \\ & + 3z_1^2 \cdot \text{tg} \alpha^2 \cdot z^2 \cdot Q \cdot r - 2z_1^2 \cdot \text{tg} \alpha^3 \cdot z^3 \cdot Q - 3z_1^2 \cdot Q \cdot r^3 - 3z_1^2 \cdot \text{tg} \alpha^2 \cdot \pi \cdot z^3 \cdot E \cdot r - \\ & - 2z^3 \cdot \text{tg} \alpha \cdot Q \cdot r^2 - \\ & - 3z^4 \cdot \text{tg} \alpha^2 \cdot Q \cdot r + 2z^5 \cdot \text{tg} \alpha^3 \cdot Q + 3z^2 \cdot Q \cdot r^3 + 3z^5 \cdot \text{tg} \alpha^2 \cdot \pi \cdot E \cdot r)) \end{aligned} \right]$$

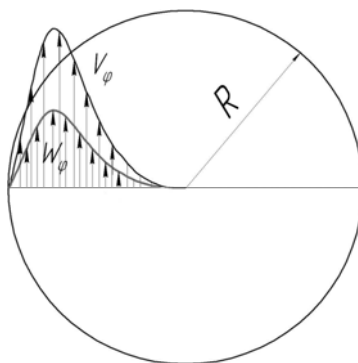


Рис. 3.9. Характер розподілу колової швидкості краплі за радіусом пристрою.

Аналіз рис. 3.9 показує, що закон розподілу колової швидкості краплі за радіусом пристрою має характер, ідентичний закону розподілу колової швидкості газового потоку за радіусом пристрою.

Ввівши позначення

$$b = \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z \cdot \rho_z}{4 \cdot \rho_y \cdot d_y}, \quad (3.58)$$

отримаємо запис третього рівняння системи (3.49)

$$\frac{dW_z}{dz} W_z = -g + b(V_z - W_z). \quad (3.59)$$

або з урахуванням (3.19)

$$\frac{dW_z}{dz} W_z = -g + b \left[\left(\frac{Q}{\pi \cdot \operatorname{tg} \alpha^2 \cdot z^2} \right) - W_z \right]. \quad (3.60)$$

Аналіз рис. 3.10 демонструє незначне збільшення витратної швидкості краплі за висотою пристрою.

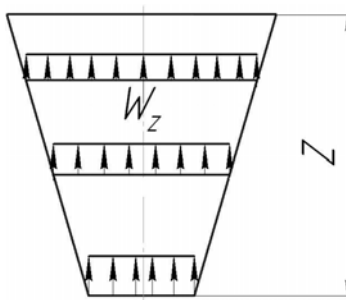


Рис 3.10. Характер розподілу витратної швидкості краплі за висотою пристрою.

3.4. Комплексний розрахунок гідродинамічних параметрів робочого простору вихрового гранулятора

Для підтвердження правильності отриманих аналітичних залежностей для обчислення складових повної швидкості газового потоку у робочому просторі вихрового гранулятора проведемо чисельне моделювання гідродинаміки газового потоку в апараті.

Математичний опис гідродинаміки суцільної фази у робочій порожнині вихрового гранулятора викликає складність розв'язання внаслідок багатofакторності процесу. Безпосереднє моделювання турбулентних течій шляхом кількісного розв'язання рівнянь Нав'є – Стокса, записаних для миттєвих швидкостей, на сьогодні є складним завданням, яке потребує ряду спрощень. Проте для розв'язання окремих задач стає можливим застосування цього фундаментального рівняння гідродинаміки при виконанні ряду умов [150, 151]:

- робота з усередненими за часом значеннями швидкостей при моделюванні турбулентних течій;
- вибір системи координат, що максимально задовольняє конкретний випадок та полегшує запис рівнянь;
- введення ряду спрощень з урахуванням конкретних умов протікання процесу в апараті.

Запропоновано такі припущення для спрощення процесу моделювання вихрового потоку газової фази у робочому просторі гранулятора [152-159]:

1. Передбачається наявність домінуючого напрямку течії, вздовж якого витратна складова швидкості всюди позитивна і набагато перевищує радіальну.
2. Передбачається, що швидкість в осьовому напрямку змінюється значно повільніше, ніж у радіальному.
3. Величини швидкостей і тиску в кожному елементарному об'ємі потоку залежать тільки від умов вище по потоку і не залежать від умов нижче по потоку.

Для повного опису гідродинаміки двофазного потоку система (3.46) доповнюється рівняннями (3.19), (3.24), (3.32), що визначають складові газового потоку у робочому просторі вихрового гранулятора.

Результати, отримані в розділах 3.3.1 та 3.3.2, покладені в основу розрахунку швидкостей та траєкторії руху гранул. Рівняння (3.56) та (3.60) розв'язувались методом Рунге-Кутта. Блок-схема алгоритму розрахунку з ідентифікаторами та текстом програми наведена в додатку А.

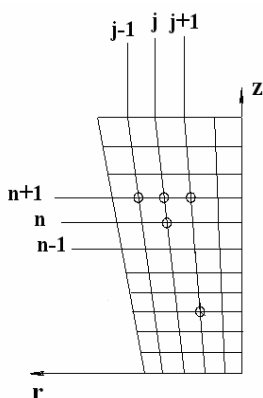


Рис. 3.11. Побудова розрахункової сітки для розв'язання математичної моделі. Рис. 3.12. Розрахункова сітка робочого простору вихрового гранулятора.

3.5. Моделювання газових потоків за допомогою програмних продуктів COSMOS FlowWorks 2006 Pre-Release та FlowVision 2003 demo

Залежно від поставлених умов проходження процесу обрано таку математичну модель [109]:

- рух газового потоку - нестислива рідина (Incompressible fluid) для розвиненої турбулентної течії.

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + \nabla(v \otimes v) = -\frac{\Delta p}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla((\mu + \mu_t)(\nabla v + (\nabla v)^T)) + S, \quad (3.61)$$

$$\nabla v = 0, \quad (3.62)$$

де v – вектор відносної швидкості, м/с; τ – час, с; p – відносний тиск, Па; ρ – густина, кг/м³; μ та μ_t – динамічна та турбулентна в'язкість, кг/(м·с); T – відносна температура, К; S – джерело.

$$S = \left(1 - \frac{\rho_{hyd}}{\rho}\right) \cdot g + B + \frac{R}{\rho}, \quad (3.63)$$

де B – сили обертання, м/с²; R – сили опору, кг/(м²·с²).

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} f_\mu, \quad (3.64)$$

де k – турбулентна енергія, м²/с; ε – швидкість дисипації турбулентної енергії, м²/с³.

$$S = \left(1 - \frac{\rho_{hyd}}{\rho}\right) g + B + \frac{R}{\rho}, \quad (3.65)$$

де ρ_{hyd} – гідростатична густина, кг/м³; B – параметр, що характеризує дію сили обертання (Коріоліса та відцентрова) у системі координат, що обертається, м/с²; R – сили ізотропного та (або) анізотропного фільтра опору, кг/(м²·с²).

Рівняння енергії

$$\frac{\partial h}{\partial \tau} + \nabla(vh) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + \frac{Q}{\rho}, \quad (3.66)$$

де h – ентальпія, м²/с²; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); C_p – питома теплоємність, Дж/(кг·К); Pr_t – турбулентне число Прандтля; Q – джерело тепла анізотропного фільтра опору, Вт/м³.

Модель турбулентної нестисливої рідини ґрунтується на k-ε-моделі турбулентності

$$\frac{\partial k}{\partial \tau} + \nabla(vk) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \frac{G}{\rho} - (\varepsilon - \varepsilon_{ini}), \quad (3.67)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \nabla(v\varepsilon) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} \left(C_1 \frac{G}{\rho} - C_2 f_1(\varepsilon - \varepsilon_{ini}) \right), \quad (3.68)$$

де ε_{ini} – початкове значення турбулентної дисипації, $\text{м}^2/\text{с}^3$; σ_k , σ_ε , $C_\mu=0$, C_1 , C_2 – значення параметрів k-ε моделі.

Рівняння конвективно-дифузійного перенесення

$$\frac{\partial C_m}{\partial \tau} + \nabla(vC_m) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_\tau}{Sc_\tau} \right) \nabla C_m \right), \quad (3.69)$$

де C_m – масова концентрація; Sc (Sc_τ) – число (турбулентне) Шмідта.

$$Sc_\tau = \frac{\mu_\tau}{\rho D_\tau} = 1. \quad (3.70)$$

Рівняння нерозривності для несучої фази

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \vec{\nabla}(\rho v) = Q_{mass}, \quad (3.71)$$

де Q_{mass} – джерело маси за рахунок частинок, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$.

3.6 Висновки до третього розділу

1. Розроблено фізичну модель руху фаз, яка дозволяє оцінити вплив гідродинамічних параметрів роботи апарата на характер та інтенсивність руху дисперсної фази в робочому просторі вихрового гранулятора.

2. На підставі розв'язання класичних рівнянь гідроаеромеханіки отримано залежності складових повної швидкості газового потоку від геометрії робочого простору апарата.

3. Створено математичну модель руху частинки у вихровому потоці газу, яка дозволяє оцінити вплив дії окремих сил на характер руху частинки та спрогнозувати поведінку створеної двофазної системи.

4. Отримано комплексну програму, що описує гідродинаміку робочого простору вихрового гранулятора зваженого шару.

5. Для моделювання руху частинок під дією закрученого газового потоку необхідно експериментально встановити характер розподілу локальних швидкостей руху газового потоку залежно від радіуса твердої стінки та висоти робочого простору залежно від типу пристрою для створення спрямованого газового потоку та співвідношення тангенційного та висхідного газових потоків.

6. Для обґрунтування можливості зменшення висоти робочого простору апарата потрібно визначити основні відмінні риси вихрових потоків у розробленій високоефективній конструкції гранулятора на підставі аналізу результатів моделювання гідродинаміки потоків із використанням сучасних методів комп'ютерного моделювання.

Основні положення розділу опубліковані в працях [98, 102, 103, 138, 143, 159-165].

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ГРАНУЛЯТОРІВ ЗІ ЗНИЖЕНОЮ ВИСОТОЮ ПОЛЬОТУ ГРАНУЛ

4.1. Мета та задачі експериментальних досліджень

Основна мета проведення експерименту при розробленні процесів та апаратів хімічної технології - перевірка адекватності запропонованої математичної моделі руху гранул у закрученому потоці газу [165] на дослідній установці. Розроблена теоретична база повинна пройти перевірку експериментальними дослідженнями. На основі зіставлення експерименту та теорії приймається рішення про можливість використання математичної моделі в промислових умовах.

Інтенсифікація процесу взаємодії потоку газу з дисперсними частинками може бути досягнута за умови штучного збільшення відносної швидкості руху. У межах апарата відбувається не лише взаємодія дисперсних частинок з потоком газу (теплоносія), але й з різноманітними конструктивними елементами, що входять до складу дослідного пристрою. Значний вплив на характер взаємодії фаз та характер їх руху мають способи підводу та відведення взаємодіючих фаз та способи створення спрямованого їх руху в межах пристрою. Використання таких конструктивних елементів дозволяє наблизити швидкість руху дисперсної фази до швидкості основного (несучого) потоку.

Задача експериментальних досліджень полягає у встановленні впливу технологічних (витрата, швидкість руху газового потоку) та конструктивних (геометричних розмірів, конфігурації окремих елементів пристрою) параметрів на гідродинаміку потоків у робочому просторі вихрового гранулятора та формування сталого вихрового псевдозрідженого шару гранул, дослідження діапазону стійкої роботи гранулятора та порівняльної оцінки ефективності роботи пристрою при різноманітних комбінаціях параметрів процесу.

Роботу дослідного зразка вихрового гранулятора експериментально досліджено в лабораторних умовах кафедри „Процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв” (ПОХНВ) Сумського державного університету (СумДУ).

4.2. Організація початкового руху газу та його вплив на рух гранул в апаратах зі зниженою висотою польоту гранул

Важливою проблемою, що постає перед дослідниками, є встановлення закономірностей руху газового потоку і, як наслідок, конфігурація псевдозрідженого шару залежно від конфігурації газорозподільного пристрою. Результатами дослідження повинні стати гідродинамічні показники роботи гранулятора при різноманітних конфігураціях газорозподільвачів.

Для проведення експерименту використано набір газорозподільних пристроїв, зображений на рис. 2.5 у розділі 2.3. У експериментальному зразку гранулятора встановлюється один із типів газорозподільного пристрою, розробленого для досліджень. Під час роботи установки проводиться візуальне спостереження руху гранул у робочому об'ємі дослідного зразка апарата. Під час проведення серії дослідів із кожним типом газорозподільного пристрою вивчали особливості траєкторії руху гранул, характер їх розподілу по робочому простору гранулятора, рівномірність розподілу гранул, інтенсивність переміщення пакетів гранул. На підставі спостережень зроблені висновки про можливість використання такої конструкції газорозподільного пристрою в промисловій практиці, були внесені пропозиції щодо зміни окремих деталей в конструкції газорозподільного апарата, що вивчається, було підібрано оптимальний варіант конфігурації цього пристрою. Паралельно проводиться обробка результатів дослідження гідродинамічних показників процесу. Газорозподільні пристрої № 1–3 функціонують в межах навантажень по газовій фазі $Q_{\text{г}}=600\text{--}1000\text{ м}^3/\text{год}$, по твердій фазі $G_{\text{тв}}=15\text{--}30\text{ кг}/\text{год}$.

Газорозподільний пристрій №1, наведений на рис. 2.5 а, є перфорованим елементом, що виготовлений з листової сталі. Основні геометричні параметри: діаметр 300 мм, товщина полотна 3 мм, діаметр отворів 4 мм, отвори розміщені рівномірно по всій площині полотна. Перевагою такого типу пристрою є те, що це найпростіша конструкція із запропонованих для дослідження. Технологія виготовлення такого вузла розподілу газового потоку в промислових масштабах не створює труднощів (усі технологічні операції виробництва є типовими в апаратобудуванні). Але для цієї конструкції характерний один недолік: отримання отворів у полотні пристрою вимагає досить великого ступеня точності щодо чистоти поверхні, яка безпосередньо контактує з газовим потоком. Одним з варіантів фінальної обробки таких отворів є, наприклад, розгортання. Такий тип обробки, на відміну від свердлення без використання чистових операцій, забезпечить рівномірний розподіл газової фази по всьому перетину газорозподільного елемента і, як наслідок, продуктивне функціонування гранулятора в цілому.

Дослідження характеру розподілу твердої фази у робочому просторі гранулятора, траєкторії її руху, геометрії зваженого шару та замірів гідродинамічних параметрів роботи пристрою (рис. 4.1) при використанні газорозподільного елемента такого типу продемонструвало таке:

- відбувається розподіл газової фази по перерізу робочої зони апарата, але цей розподіл нерівномірний, що зумовлює нестабільний рух гранул по робочому об'єму;

- неможливо визначити характер і траєкторію руху твердих часток унаслідок нерівномірності подачі газової фази в різні точки робочого простору гранулятора;

- у робочому об'ємі апарату створено не вихровий, а нерівномірний зважений шар, який є більш близьким до фонтануючого, з деякими спонтанними завихреннями в різних його частинах без встановлення закономірностей їх появи;

- висота зваженого шару коливається в межах 350-400 мм у діапазоні мінімального та максимального навантаження по фазах;
- спостерігається нерівномірність розподілу складових швидкості газового потоку по перерізу робочого простору стенда №1 (рис. 4.2);
- утворено застійні зони біля стінок внутрішнього конуса.

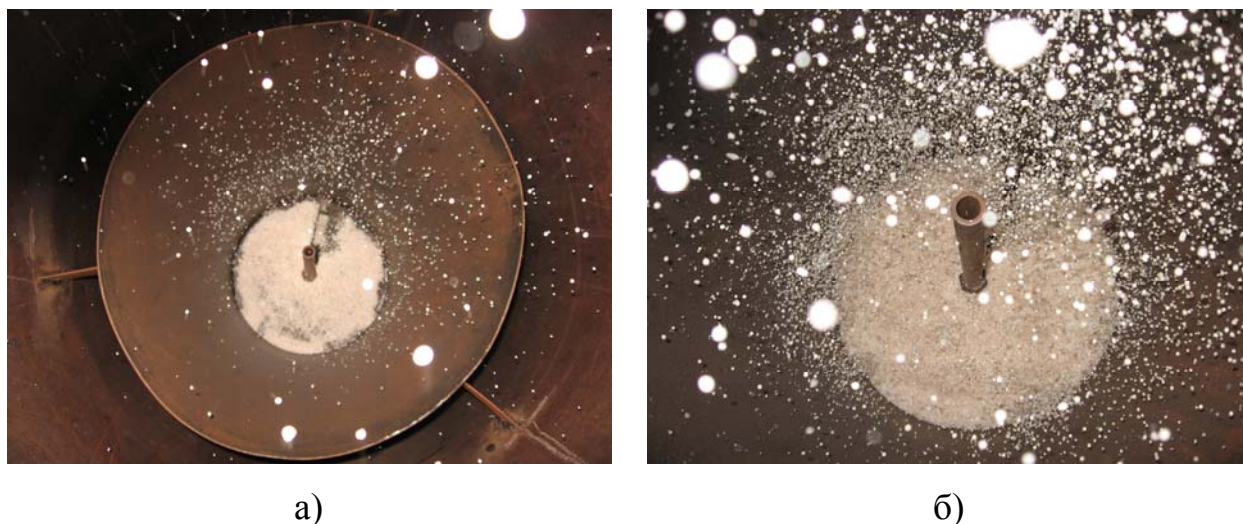


Рис. 4.1. Розподіл гранул в апараті за умови встановлення плоского перфорованого газорозподільного пристрою: а) вихід на робочий режим ($G_{ТВ}=15$ кг/год, $Q_{Г}=600$ м³/год); б) стабільний зважений шар ($G_{ТВ}=30$ кг/год, $Q_{Г}=1000$ м³/год).

У результаті проведених досліджень цього типу газорозподільного пристрою можна зробити висновок про неможливість його використання для створення сталого вихрового псевдозрідженого шару, незважаючи на достатньо просту конструкцію і технологію виготовлення.

Запропонована для розгляду конструкція газорозподільного пристрою №2 (рис. 2.5 б), також є плоским перфорованим елементом, що виготовлений з листової сталі. Основні геометричні параметри: діаметр 300 мм, товщина полотна 3 мм, діаметр отворів 4 мм, отвори розміщено трьома секціями. Переваги і недоліки цього типу газорозподільного пристрою ті самі, що і у попередньому випадку. Але на відміну від попередньої дана конструкція характеризується наявністю двох лопаток, розміщених симетрично на полотні газорозподільного елемента і встановлених під кутом 45° для надання газовій фазі закрученої

траєкторії. Наявність елементів завихрення газового потоку дозволяє змінити характер руху технологічного повітря, що надходить до робочого простору гранулятора для створення псевдозрідженого шару гранул за рахунок спрямованого руху газового потоку крізь лопатки на газорозподільному пристрої.

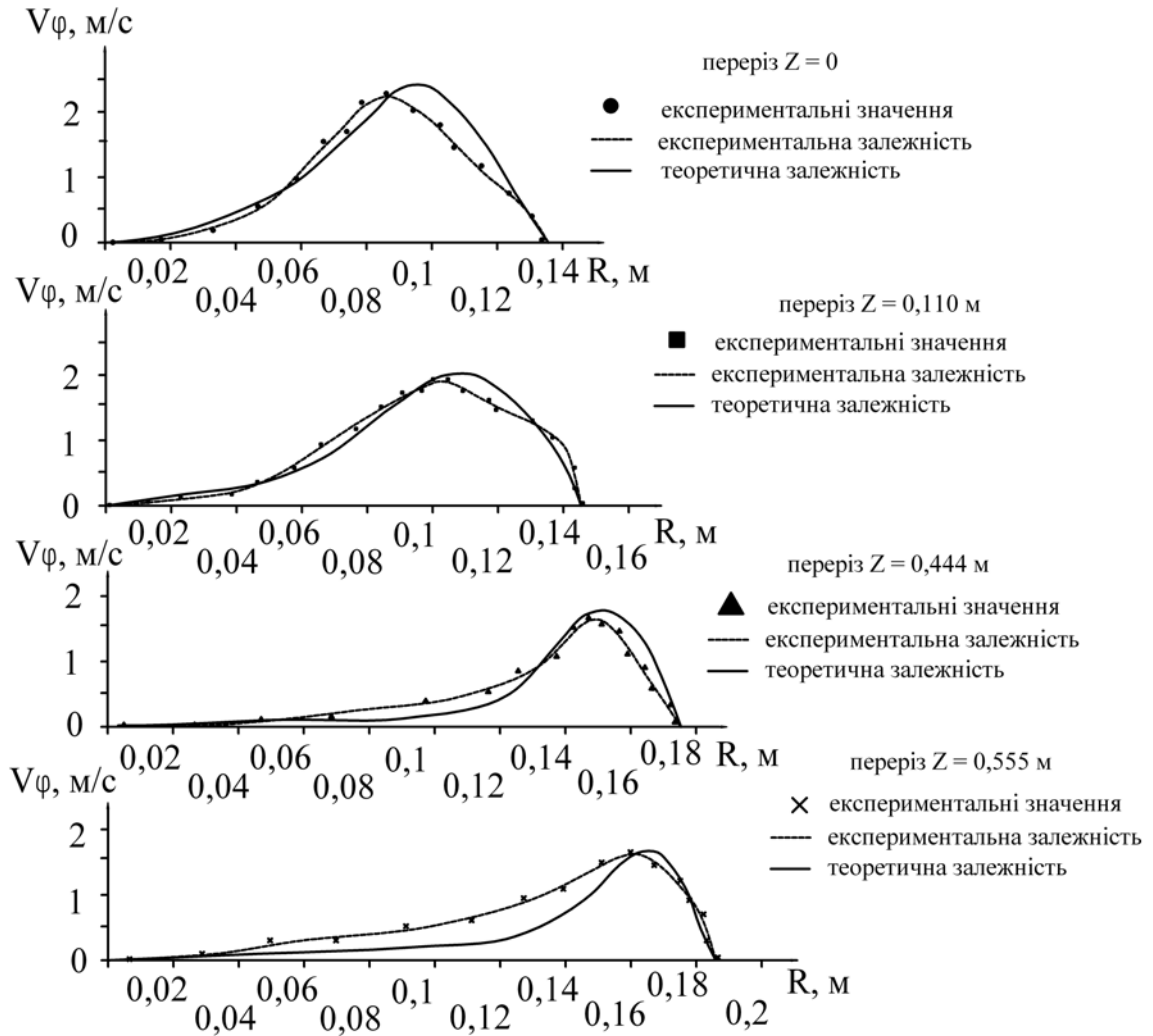


Рис. 4.2. Характер зміни епюр колової складової швидкості газового потоку по висоті робочого простору вихрового гранулятора зваженого шару залежно від радіуса його перерізу (відлік висоти X ведеться від верхнього перетину газорозподільного пристрою) для газорозподільного пристрою №1.

Спостереження характеру розподілу твердої фази і траєкторії її руху при використанні у вихровому грануляторі газорозподільного пристрою такого типу (рис. 4.3) дозволило зробити такі висновки:

- відбувається розподіл газової фази по перерізу робочої зони апарата (на висоті 70-100 мм), але він також нерівномірний внаслідок використання

простого свердлення як виду фінальної обробки перфорованої частини газорозподільного пристрою. Аналогічно до простого перфорованого елемента, це спричиняє за собою несталий рух гранул по робочому об'єму гранулятора;

- у той самий час, завдяки наявності лопаток, що надають газовому потоку закрученої траєкторії руху, зважений шар набуває більш сталого характеру і властивостей вихрового руху по всьому робочому об'єму гранулятора;

- гранули псевдозрідженого шару набувають впорядкованого руху по спіралеподібній траєкторії, але ця траєкторія руху може порушуватися і вихровий шар може набувати ознак фонтануючого; цю зміну неможливо передбачити і контролювати за допомогою варіації технологічних параметрів у певному діапазоні роботи експериментального стенда;

- висота зваженого шару у випадку використання газорозподільного пристрою №2 становить 250-300 мм;

- спостерігається вирівнювання полів швидкостей по перерізу робочого простору стенда №1(рис. 4.4);

- утворення застійних зон біля стінок внутрішнього конуса має менш виражений характер.



а)



б)

Рис. 4.3. Розподіл гранул в апараті за умови встановлення плоского перфорованого газорозподільного пристрою з завихрювачами: а) вихід на робочий режим ($G_{ТВ}=15$ кг/год, $Q_{Г}=600$ м³/год); б) стабільний зважений шар ($G_{ТВ}=30$ кг/год, $Q_{Г}=1000$ м³/год).

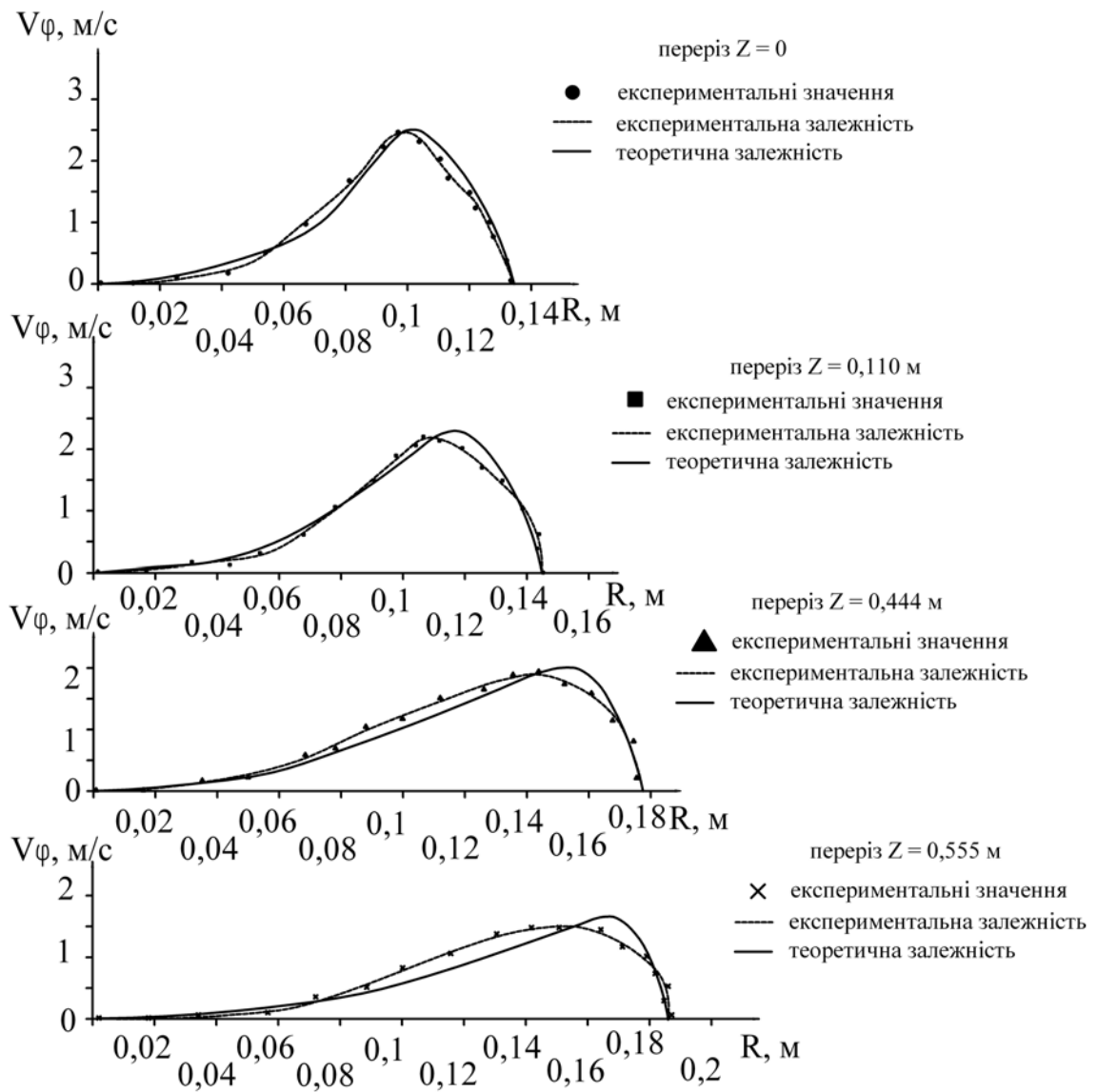


Рис. 4.4. Характер зміни епюр колової складової швидкості газового потоку по висоті робочого простору вихрового гранулятора зваженого шару залежно від радіусу його переріза (відлік висоти X ведеться від верхнього перерізу газорозподільного пристрою) для газорозподільного пристрою №2.

Газорозподільним пристроям №1,2 властивий ще один спільний недолік: при виготовленні таких елементів конструкції гранулятора необхідне суворе дотримання співвідношення між площею поверхні перфорованої частини пристрою і його загальною площею перерізу. Недотримання встановлених норм буде мати негативний вплив і може стати причиною нестабільного вихрового руху газової фази.

На підставі викладених результатів візуального дослідження можна констатувати, що застосування газорозподільного пристрою №3 для створення за-

крученого газового потоку, а також надання гранулам спіралеподібної траєкторії руху, є перспективним. У той самий час ця конструкція потребує вдосконалення для реалізації можливості вирівнювання діапазону колових швидкостей у кожному перерізі робочого простору гранулятора.

Удосконалена конструкція газорозподільного пристрою №3 (рис. 2.5 в) складається з двох зон, що сприяють інтенсифікації процесу утворення вихрового руху газового потоку та встановлення його сталого руху. Основні геометричні параметри: діаметр 300 мм, товщина полотна 3 мм. Перша зона вихроутворення конструктивно оформлена наступним чином: на нижньому перетині газорозподільовача знаходиться шість елементів-перегородок Г-подібного типу, що встановлені симетрично вертикальній осі робочого простору гранулятора. Завдяки контакту технологічного повітря з перегородками досягається первісне утворення закрученого газового потоку; до другої зони контакту газова фаза надходить крізь отвори в полотні, маючи колову складову швидкості руху та рівномірно розподілившись по всьому перерізу пристрою. Цього не спостерігається в двох перших газорозподільовачах, де газовий потік не має можливості набути обертового руху. Друга зона газорозподільного пристрою має шість похилих лопаток під кутом 45° , установлених на верхньому перерізі під кутом до плоского полотна. Ці лопатки є завихрювачами, які повинні надати газовому потоку, що надходить в апарат, додаткового закручування по спіралеподібній траєкторії. Розміщення лопаток збігається з розміщенням перегородок. Запропонована конструкція характеризується також наявністю конічної частини, що запобігає утворенню застійних зон у стінок робочої порожнини гранулятора.

Характер розподілу твердої фази і траєкторія її руху при впровадженні такого газорозподільного пристрою (рис. 4.5) показали:

- розподіл газової фази по перерізу робочої зони апарата рівномірний в кожній її окремій частині;
- псевдозріджений шар набуває сталого характеру і ознак вихрового руху по всьому робочому об'єму гранулятора;

- гранули набувають яскраво вираженої впорядкованої спіралеподібної траєкторії руху;
- висота зваженого шару коливається в діапазоні 200-250 мм;
- по перерізу робочого простору стенда №1 значення складових швидкості газового потоку вирівнюються;
- утворення застійних зон біля стінок внутрішнього конуса відсутнє завдяки конічній вставці та підвищенню інтенсивності руху закрученого газового потоку.



Рис. 4.5. Розподіл гранул в апараті за умови встановлення комбінованого газорозподільного вузла з завихрювачами: а) вихід на робочий режим ($G_{\text{ТВ}}=15$ кг/год, $Q_{\text{Г}}=600$ м³/год); б) стабільний зважений шар ($G_{\text{ТВ}}=30$ кг/год, $Q_{\text{Г}}=1000$ м³/год).

Таким чином, використання такого типу газорозподільного пристрою наочно відображає створення вихрового псевдозрідженого шару в експериментальному стенді і дозволяє візуально спостерігати за характером переміщення твердих частинок у робочому об'ємі гранулятора.

Проведемо аналіз руху частинок у газовому потоці за умови використання останнього газорозподільного пристрою, що досліджувався (аналіз роботи попередніх пристроїв не є доцільним унаслідок виявлених недоліків). Результати експериментального дослідження гідродинамічних показників роботи гранулятора з використанням пристрою №3 (рис 2.4 в) наведено на рис. 4.6-4.7.

Аналіз епюр складових швидкості закрученого газового потоку в робочій порожнині вихрового гранулятора псевдозрідженого шару (рис 4.6-

4.7) дозволяє переконливо і наочно продемонструвати правильність вибору конструкції газорозподільного вузла із запропонованого ряду конструкцій для експериментального дослідження на модельній установці виробництва гранульованих продуктів №1.

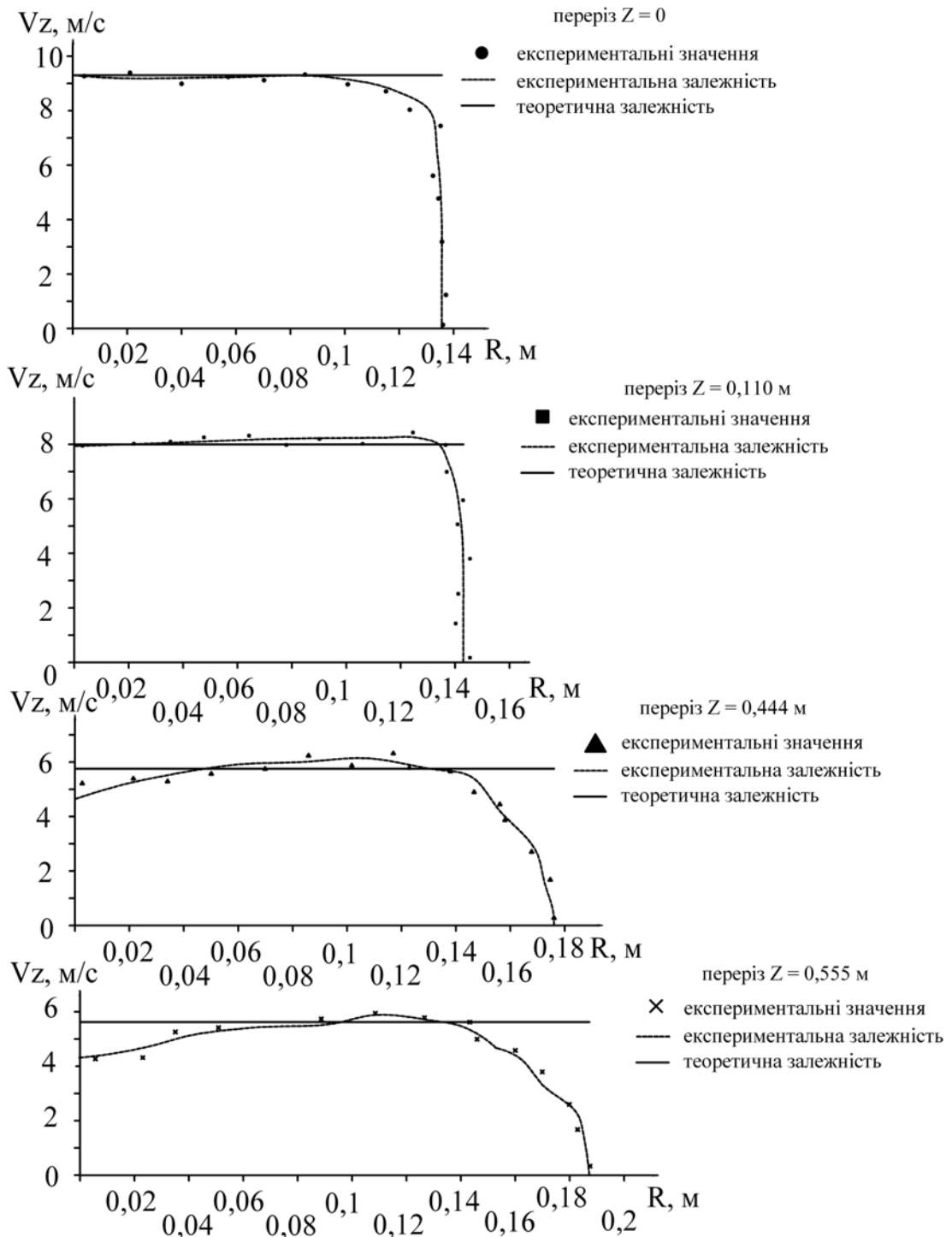


Рис. 4.6. Характер зміни епюр витратної складової швидкості газового потоку по висоті робочого простору вихрового гранулятора зваженого шару залежно від радіуса його перерізу для газорозподільного пристрою №3.

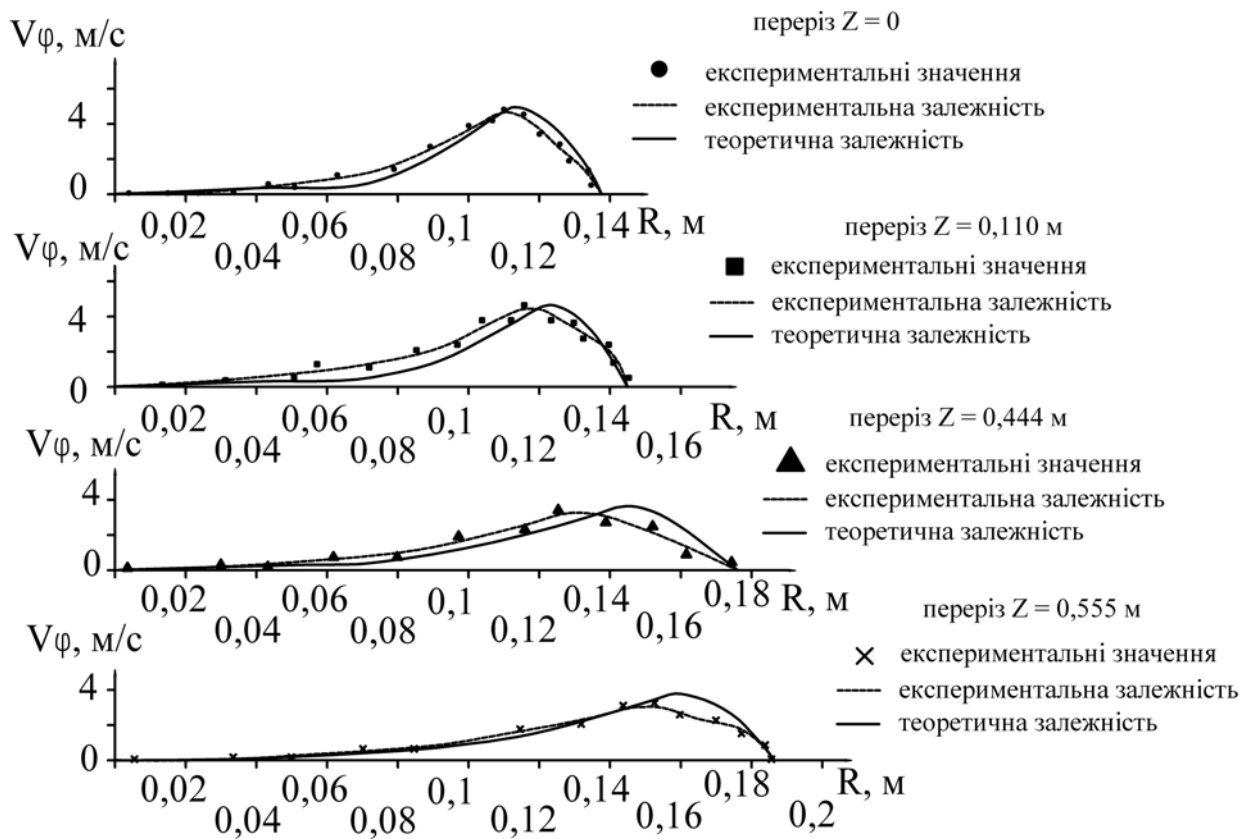


Рис. 4.7. Характер зміни епюр колової складової швидкості газового потоку по висоті робочого простору вихрового гранулятора зваженого шару залежно від радіуса його перерізу для газорозподільного пристрою №3.

Епюри колової і витратної складових швидкості газового потоку не мають значних стрибків по горизонтальному перерізу робочого простору вихрового гранулятора, тобто від осі апарата і практично до його периферії (де відбувається згасання швидкості за рахунок контакту із стінками робочого простору апарата) зберігається рівномірний розподіл газового потоку. Подібна картина спостерігається в кожному перерізі робочої порожнини гранулятора при зміні висоти в граничних умовах від верхнього перерізу газорозподільного пристрою і до верхнього перерізу додаткового конуса гранулятора. На підставі аналізу запропонованих епюр можна зробити ще один важливий висновок, який має визначальний вплив на отримання гранульованого продукту високої якості за допомогою впровадження у виробництво технології грануляції з використанням вихрових малогабаритних апаратів: вирівнювання полів швидкостей газового потоку спостерігається не тільки в окремо взятому перерізі робочої

зони гранулятора, але й в усьому робочому просторі апарата; незалежно від координати Y зберігається досить вузький діапазон зміни швидкості руху газової фази. Швидкість газового потоку по вертикалі (від перерізу з координатою Y до перерізу з координатою $Y+\Delta Y$) змінюється незначною мірою, зберігаючи також постійність свого значення від центра до периферії. Фактично в кожному довільно вибраному елементарному об'ємі даного робочого простору гранулятора значення швидкості руху газового потоку коливається трохи порівняно з іншим довільно вибраним елементарним об'ємом у межах заданих граничних умов, тобто радіусу додаткового внутрішнього корпусу апарата і його висоти.

Таким чином, будь-яка гранула, що потрапляє в робочий простір гранулятора, однаково взаємодіє із закрученим газовим потоком у кожній його точці, що сприяє рівномірному проходженню процесу теплообміну і масообміну в двофазній системі, що утворилася, і перешкоджає утворенню застійних зон і виходу з апарата гранул, які внаслідок недостатнього контакту з потоком теплоносія остаточно не утворили свою кристалічну структуру, зупинившись на якомусь проміжному етапі її формування.

В робочій зоні гранулятора буде максимально виключене проскакування окремих частинок і пакетів гранул, а також затримка їх у довільно вибраному перерізі робочої зони на якийсь час, що перевищує мінімально необхідний для формування стійкої кристалічної структури гранули.

4.3. Дослідження впливу гідродинамічних чинників на роботу гранулятора

Оптимальне співвідношення висхідного та тангенційного потоків сприяє утворенню рівномірного псевдозрідженого шару з високою інтенсивністю тепломасообміну в робочому просторі гранулятора. Оптимум досягається в межах діапазону навантажень по фазах у разі отримання рівномірного поля швидкостей та рівномірного розподілу гранул по робочому об'єму дослідного стенда вихрового гранулятора.

Експеримент на стенді №2 проводився за умов таких навантажень по фазах: по газовій фазі $Q_{\Gamma} = 500\text{--}700\text{ м}^3/\text{год}$, по твердій фазі $G_{\Gamma} = 30\text{ кг}/\text{год}$.

Було визначено експериментальні гідродинамічні характеристики псевдозрідженого шару при зміні конфігурації потоку. Регулюючи співвідношення потоків за допомогою шиберних засувок (рис. 2.4), отримано характерні ознаки псевдозрідженого шару різних типів, візуалізацію яких проведено за допомогою високоякісної відеозйомки.

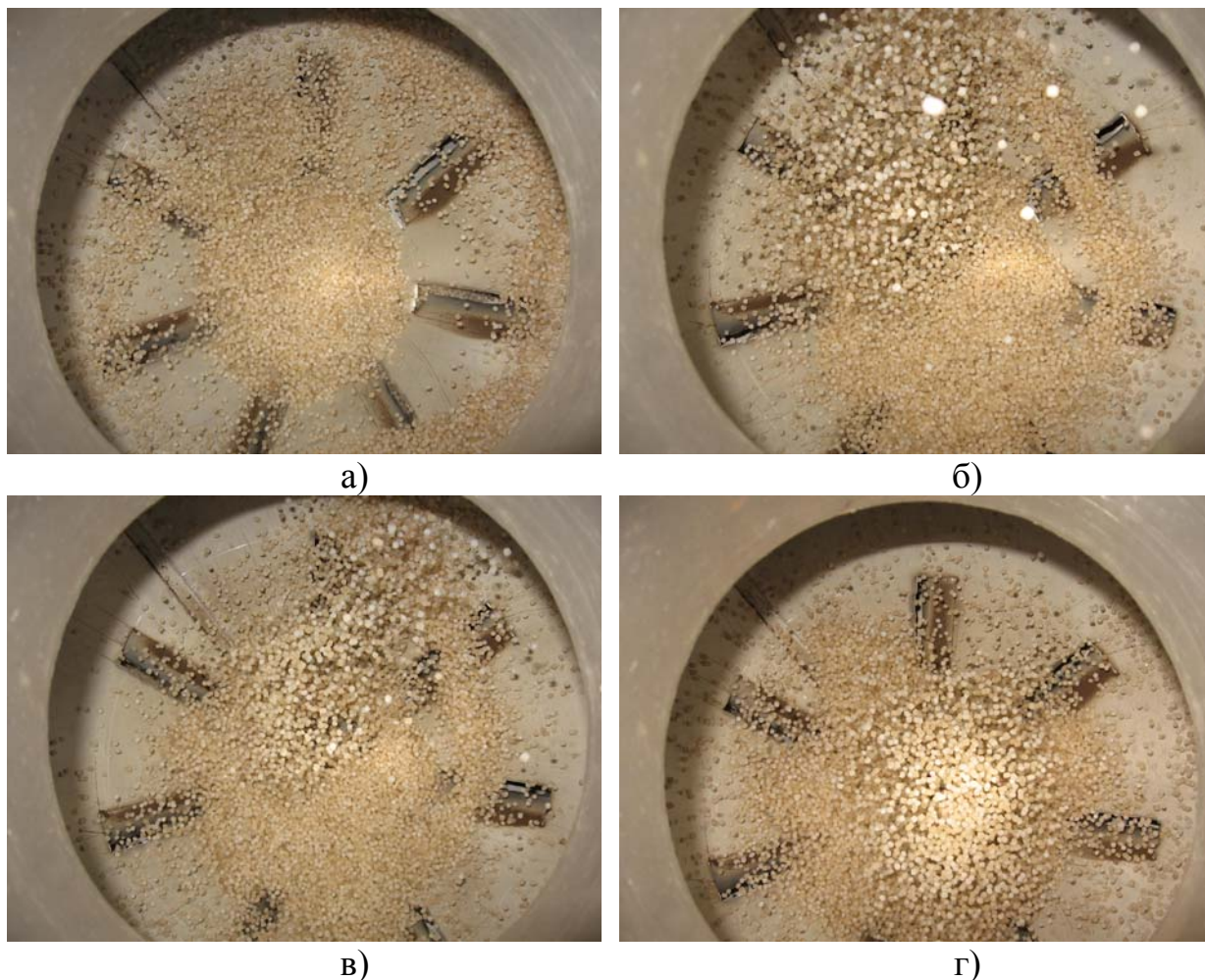


Рис. 4.8. Конфігурація зваженого шару в робочому просторі вихрового гранулятора залежно від співвідношення витрат на створення висхідного та тангенційного потоку повітря:

а) інтенсивний вихровий зважений шар ($Q_{\text{В}}=0$) $G_{\text{ТВ}}=30\text{ кг}/\text{год}$, $Q_{\Gamma}=500\text{ м}^3/\text{год}$; б), в) комбінований зважений шар з елементами фонтануючого та вихрового типу невеликої інтенсивності ($Q_{\text{В}}/Q_{\Gamma}=0,4$) $G_{\text{ТВ}}=30\text{ кг}/\text{год}$, $Q_{\Gamma}=600\text{ м}^3/\text{год}$; г) інтенсивний комбінований зважений шар ($Q_{\Gamma}\gg Q_{\text{В}}$) $G_{\text{ТВ}}=30\text{ кг}/\text{год}$, $Q_{\Gamma}=700\text{ м}^3/\text{год}$.

Основні (характерні) співвідношення висхідного (G_B) та тангенційного (G_T) потоків повітря:

$G_B = 0$ (відкрито тільки засувку тангенційного потоку);

$G_B / G_T = 0,4$ (відкриті обидві засувки);

$G_T \gg G_B$ (відкрито тільки засувку висхідного потоку).

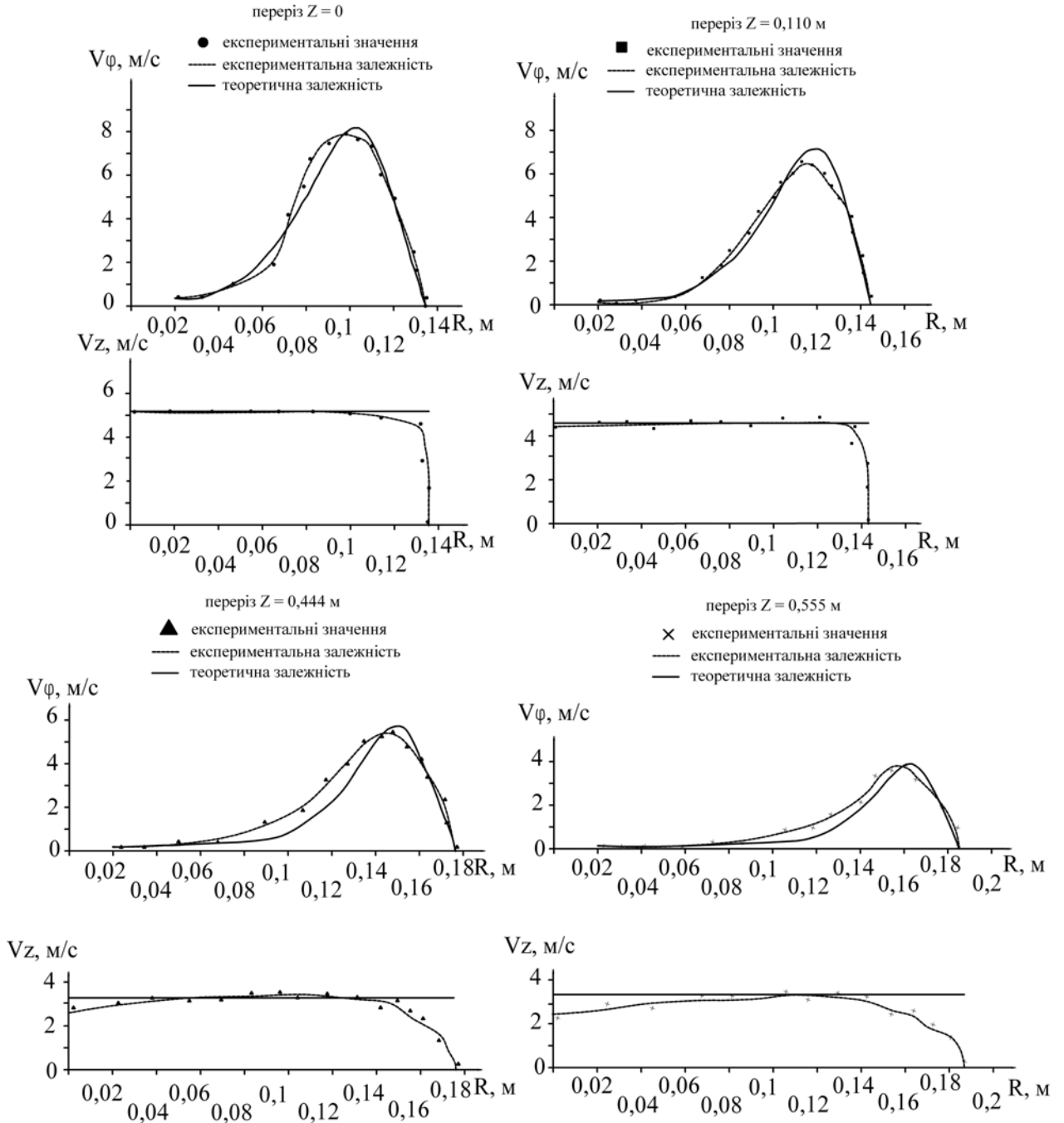


Рис. 4.9. Основні гідродинамічні характеристики роботи інтенсивного вихрового зваженого шару (згідно з рис. 4.8 а).

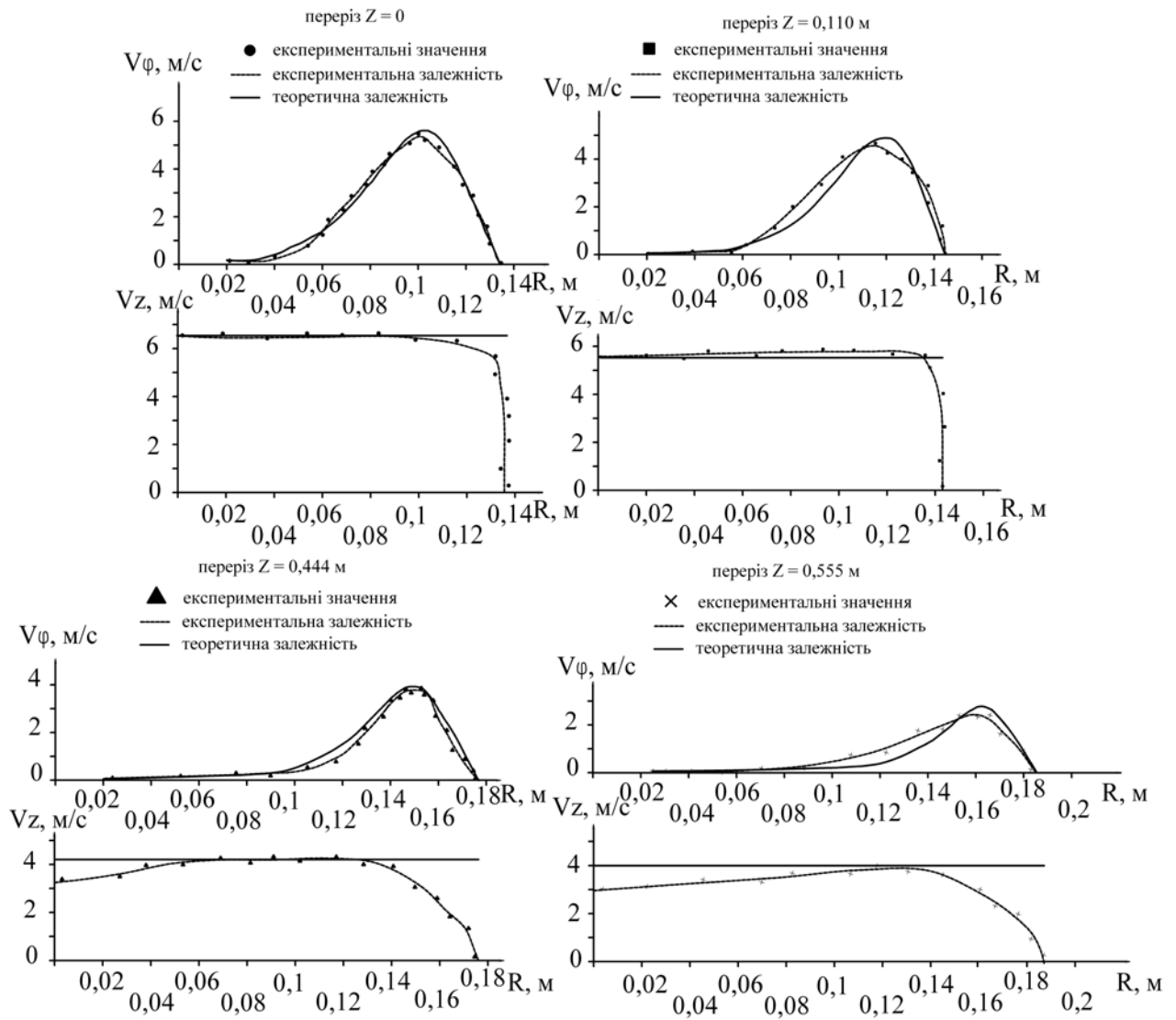


Рис. 4.10. Основні гідродинамічні характеристики роботи перехідного комбінованого зваженого шару (згідно з рис. 4.8 б, в).

Визначено характерні риси функціонування кожного з різновидів псевдозрідженого шару при зміні навантажень по газовій та твердій фазах та зміні співвідношення тангенційної та висхідної складових газового потоку. На наведених фото спостерігаються характерні зони вихрового зваженого шару (периферія робочого об'єму вихрового гранулятора) та зони фонтануючого шару (центральна частина робочого об'єму пристрою). Це дає змогу встановити та спрогнозувати поведінку крапель, що надходять в робочий простір пристрою з розпилювача, та твердих частинок (гранул), що знаходяться в об'ємі апарата та виконують функцію центрів кристалізації.

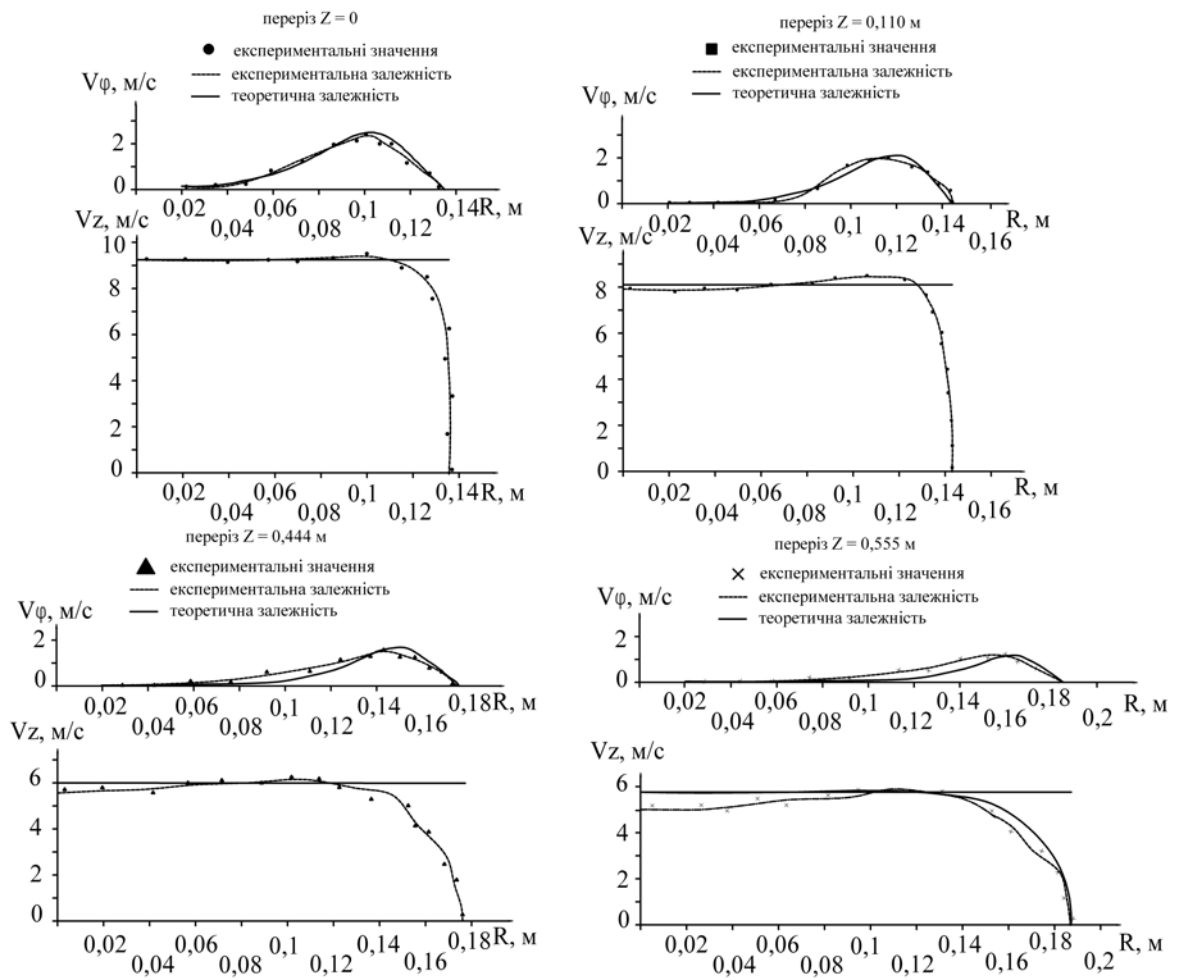


Рис. 4.11. Основні гідродинамічні характеристики роботи інтенсивного комбінованого зваженого шару (згідно з рис. 4.8 г).

Спираючись на результати візуального спостереження, стає можливим визначити траєкторію руху частинок у кожній зоні гранулятора та в цілому в робочому просторі. Використання цих висновків дозволить встановити час перебування гранул в апараті та спрогнозувати оптимум відрізка часу, при якому процес кристалізації та сушіння проходить повною мірою, не пошкоджуючи структури гранули.

4.4 Висновки до четвертого розділу

1. Установлено характер руху гранул та основні гідродинамічні характеристики роботи пристроїв для створення вихрового потоку теплоносія залежно від конфігурації елемента для завихрення. Відзначено нерівномірність розподі-

лу складових швидкості газового потоку та пік значень швидкості: газорозподільний пристрій №1 – в межах $V_{\phi}=1,4-2,4$ м/с; газорозподільний пристрій №2 – в межах $V_{\phi}=1,3-2,6$ м/с.

2. Виявлено зони зменшення інтенсивності руху гранул у робочому об'ємі вихрового гранулятора (стенд №1) та надано рекомендації щодо усунення вищенаведених недоліків підбором газорозподільного пристрою №3 зі значенням колової швидкості в межах $V_{\phi}=5-5,2$ м/с порівняно з газорозподільними пристроями №1,3, які мають значення $V_{\phi}=2,5-2,7$ м/с. Значення піка швидкості по висоті апарата коливається в межах $V_{\phi}=3,8-4,6$ м/с.

3. Визначено оптимальну з точки зору можливості зменшення габаритних розмірів робочого простору вихрового апарата конструкцію завихрювача для створення вісесиметричного потоку теплоносія та зони максимальної інтенсивності вихрового руху гранул у робочому об'ємі апарата на рівні (0,6–0,8) висоти апарата при розвиненому турбулентному гідродинамічному режимі руху теплоносія ($Re \geq 10000$) з візуалізацією у вигляді графічних залежностей та фотографій характеру розподілу локальних швидкостей руху гранул. Область існування сталого вихрового зваженого шару для апаратів отримано за умов таких навантажень по фазах: по газовій фазі $Q_{\Gamma}=600-1000$ м³/год; по твердій фазі $G_{\text{ТВ}}$ до 30 кг/год.

4. Досліджено та отримано максимально ефективне співвідношення висхідного та тангенційного потоків теплоносія для створення сталого зваженого шару у робочому об'ємі гранулятора (стенд №2) на рівні співвідношення $G_{\text{В}}/G_{\text{Т}}=0,4$ в межах наступних навантажень по фазах: по газовій фазі $Q_{\Gamma}=500-700$ м³/год; по твердій фазі $G_{\text{ТВ}}$ до 20 кг/год.

Основні наукові результати розділу опубліковані в роботах [112, 166-174].

РОЗДІЛ 5

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1. Аналіз впливу гідродинамічних характеристик газового потоку на рух гранул у вихровому грануляторі

Для аналізу складових повної швидкості руху необхідно визначити характер графічних залежностей складових та зіставити їх у межах одного порівняльного графіка. Як характерний перетин робочого простору вихрового гранулятора наведено зону максимальної інтенсивності руху гранул, яка була визначена за результатами візуального спостереження паралельно з замірами за допомогою зондів складових швидкостей газового потоку (розділ 4, рис. 4.8 г). Визначена зона найбільш переконаливо відображає характер руху гранул під дією закрученого газового потоку з елементами висхідного руху в центрі робочого простору вихрового гранулятора та дозволяє наочно виділити зони з різною конфігурацією зваженого шару.

Аналіз графічних залежностей зміни витратної швидкості газового потоку за різних умов (рис. 5.1 та 5.2) визначив монотонний характер зниження витратної швидкості за всіх умов проведення розрахунків.

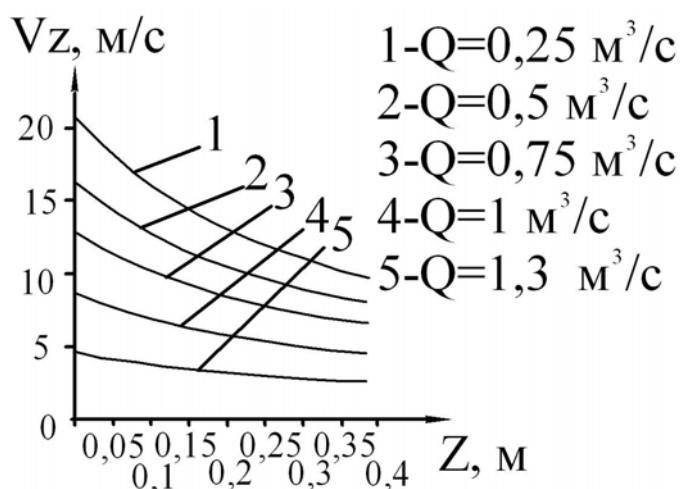


Рис. 5.1. Розрахунковий характер зміни витратної швидкості газового потоку по висоті залежно від витрати газового потоку (при $\alpha=13^\circ$).

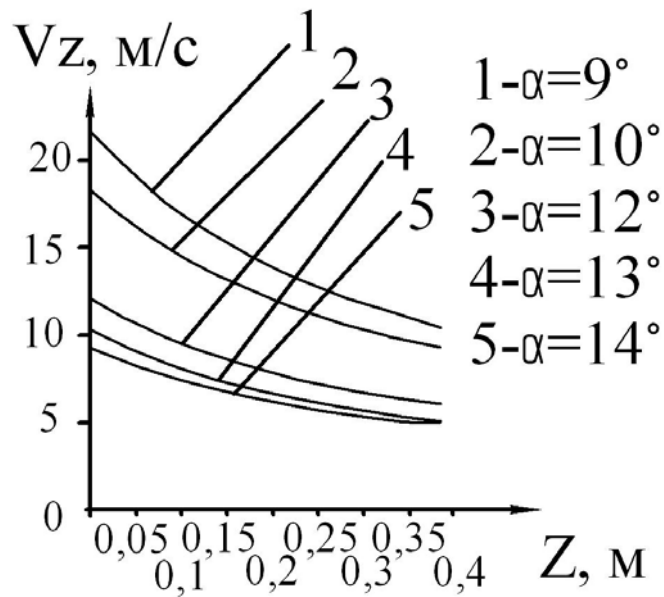


Рис. 5.2. Розрахунковий характер зміни витратної швидкості газового потоку по висоті залежно від кута розкриття конуса робочого простору вихрового гранулятора (при $Q=0,63 \text{ м}^3/\text{с}$).

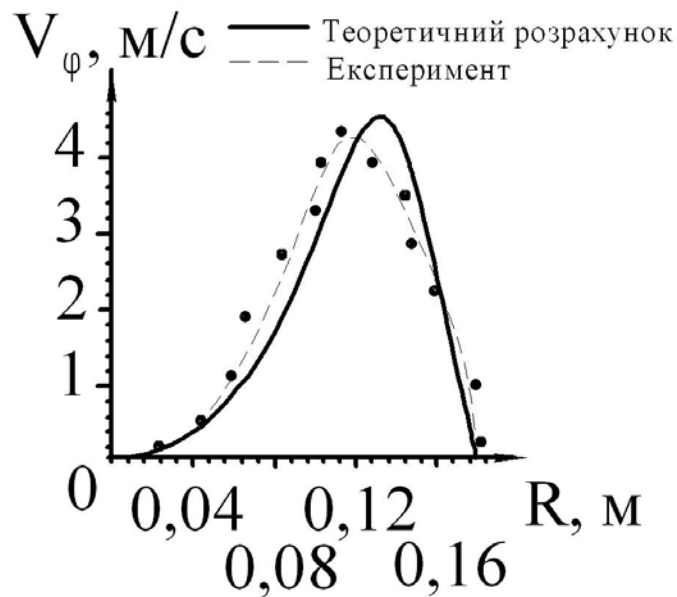


Рис. 5.3. Зіставлення даних по коловій швидкості газового потоку, отриманих теоретичними розрахунками та експериментальним шляхом (при $\alpha=13^\circ$, $z=0,8 \text{ м}$).

З рис. 5.3 видно, що пік колової швидкості газового потоку, що отримана за результатами експерименту, дещо зміщений порівняно з результатами теоретичного розрахунку. Візуально підтверджено, що зона максимальної швид-

кості розміщена саме між піками, які наведено на графіку, зі збереженням характерного руху гранул у зоні, що розглядається. Зона максимальної колової швидкості на висоті $z=0,8$ м при половині кута розкриття конусу розміщена в межах $r=0,1-0,15$ м. Зіставлення результатів теоретичного розрахунку для різних перерізів робочого простору та різних кутів розкриття конуса доводить (рис. 5.4), що зона максимальної колової швидкості для довільно обраного перерізу становить $r=0,66-0,72 R$.

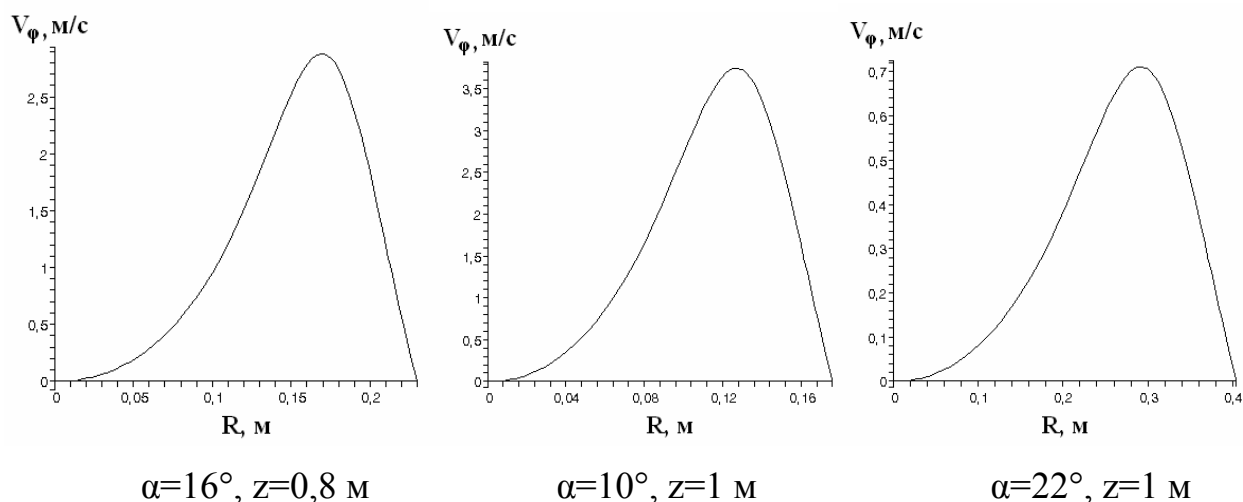


Рис. 5.4. Результати розрахунку колової швидкості за різних умов.

Аналіз графічних залежностей демонструє зменшення зони зростання колової швидкості при збільшенні витрати газового потоку та звуження діапазону максимальної швидкості. При цьому пік швидкості залишається постійним за геометричним місцем у робочому просторі вихрового гранулятора.

Значення колової швидкості зі збільшенням витрати газового потоку збільшується швидше. У той самий час, при збільшенні витрати газового потоку в робочому просторі вихрового гранулятора збільшується зона повільного зростання колової швидкості. Таким чином, вихор зміщується в бік твердої стінки та набуває більшої інтенсивності.

Аналіз залежностей зміни колової швидкості за різних умов (рис. 5.5 – 5.7) визначив закономірність розподілу швидкостей за радіусом пристрою та якісну їх зміну залежно від набору параметрів.

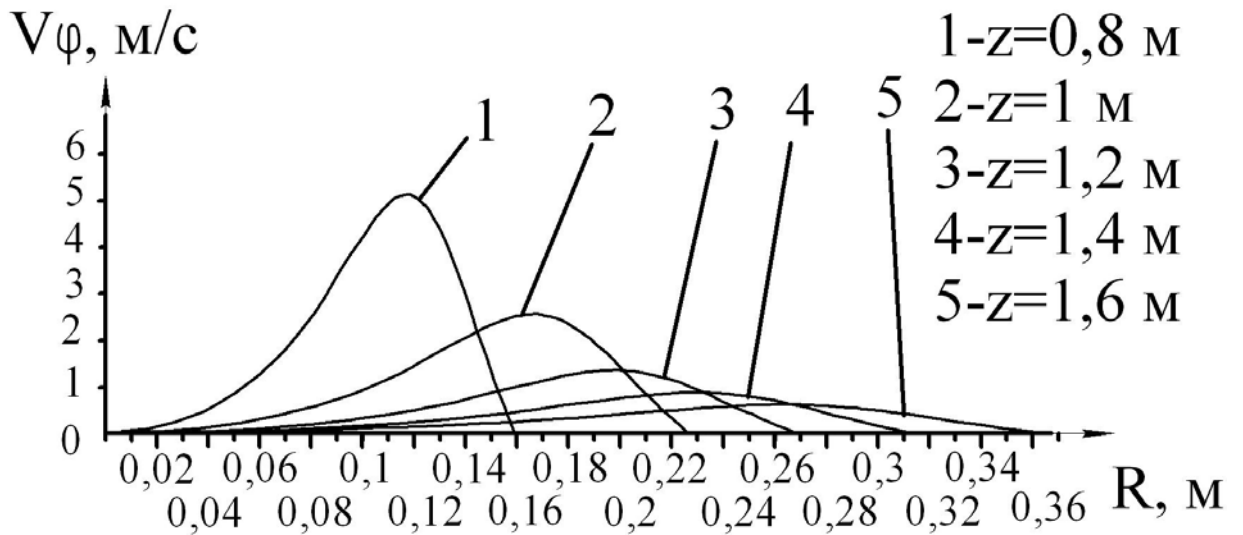


Рис. 5.5. Розрахунковий характер зміни колової швидкості газового потоку залежно від висоти робочого простору вихрового гранулятора (при $\alpha=13^\circ$, $Q=0,63 \text{ м}^3/\text{с}$) на різних висотах (z) поперечного перетину.

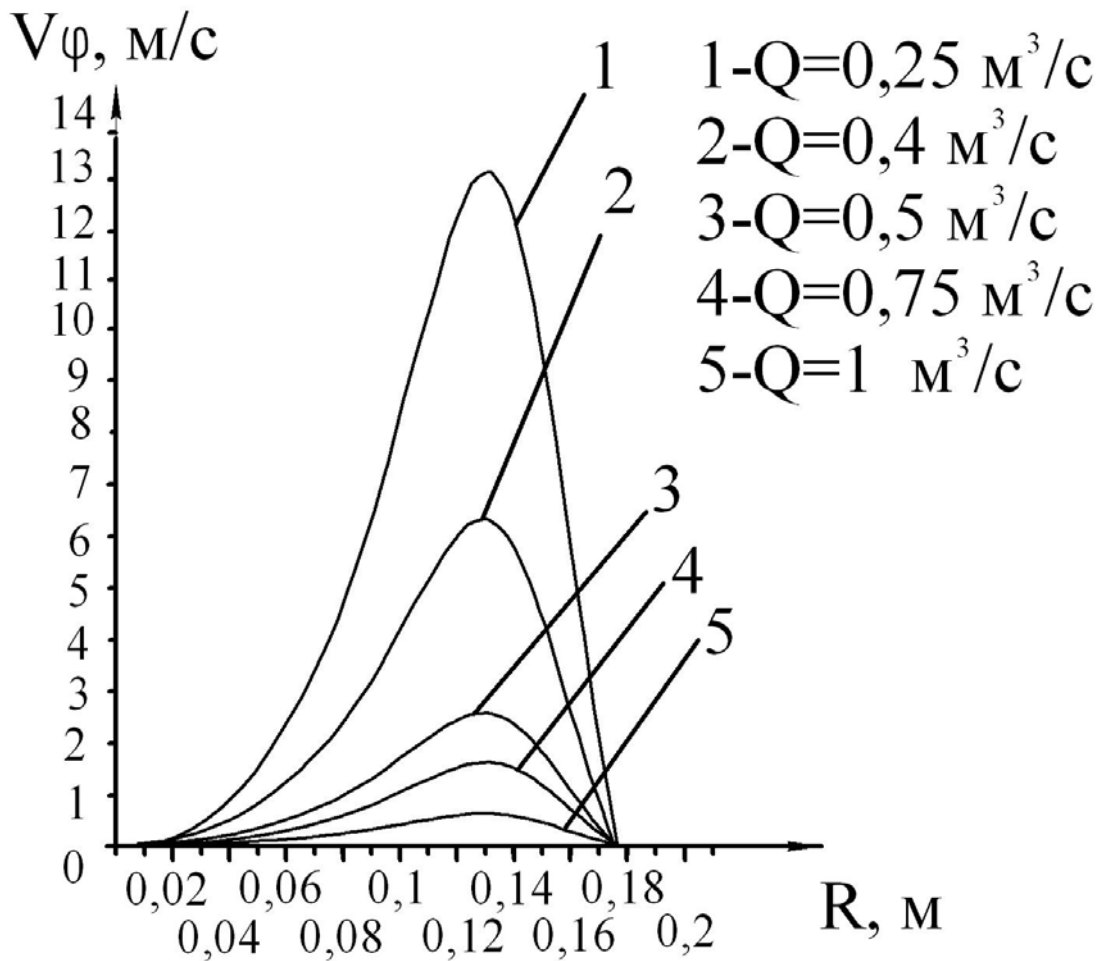


Рис. 5.6. Розрахунковий характер зміни колової швидкості газового потоку залежно від витрати газового потоку (Q) (при $\alpha=13^\circ$, $z=0,8 \text{ м}$).

Зважаючи на результати аналізу піка існування колової швидкості газового потоку по перерізу робочого простору апарата, для отримання гранульованого продукту з розплавів (розчинів) пристрій (або групу пристроїв) для розпилення доцільно встановлювати в межах робочого простору вихрового гранулятора в визначеному діапазоні поточного радіуса при довільно обраній висоті та куті розкриття конуса з урахуванням рекомендацій, отриманих за результатами експерименту (оптимальну висоту розміщення пристрою для розпилення визначено в межах $h=0,6-0,8H$).

Плавне збільшення колової швидкості газового потоку до досягнення піка та зменшення її після проходження піка дістало підтвердження експериментом та визначило діапазон роботи газорозподільного пристрою з максимальною ефективністю. У зоні мінімального значення колової швидкості інтенсифікація руху гранул та попередження застійних зон, що можливі в діапазоні до $r=0,25R$, досягається раціональним підбором газорозподільного пристрою з додатковими елементами для завихрення потоку (розділ 2, рис. 2.5).

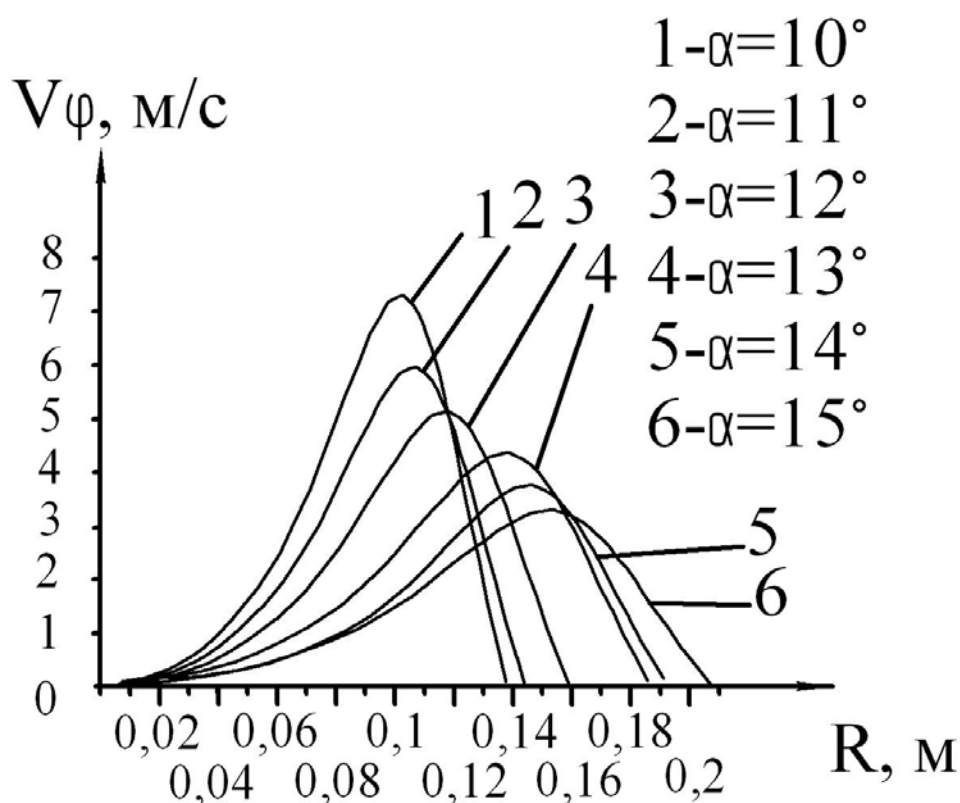


Рис. 5.7. Розрахунковий характер зміни колової швидкості газового потоку залежно від кута розкриття конуса (φ) (при $Q=0,63 \text{ м}^3/\text{с}$, $z=0,8 \text{ м}$).

Значення радіальної швидкості газового потоку, отримані за результатами аналітичного розв'язання, та експериментальні дані мають високий ступінь відповідності. Спостерігається взаємне відхилення числового значення швидкості, та в цілому графічне зображення епюри радіальної складової повної швидкості газового потоку має однаковий характер. Спостерігається рівномірне зменшення значення радіальної швидкості від центра (ядра) газового потоку до периферії.

За результатами аналізу визначено вплив кута розкриття конічного робочого простору на можливість появи зворотних вихрів у центрі зваженого шару та місце геометричне місцеположення ділянки з'єднання окремих елементів зваженого шару і перехідної області комбінованого зваженого шару. Зі збільшенням кута розкриття конуса (до $10-13^\circ$) зона зворотних вихрів має постійне значення та визначається в межах $r = (0,15-0,25)R$. Така картина спостерігається приблизно до $h = (0,3-0,4)H$. Рециркуляційна зона розміщена в горловині дифузора.

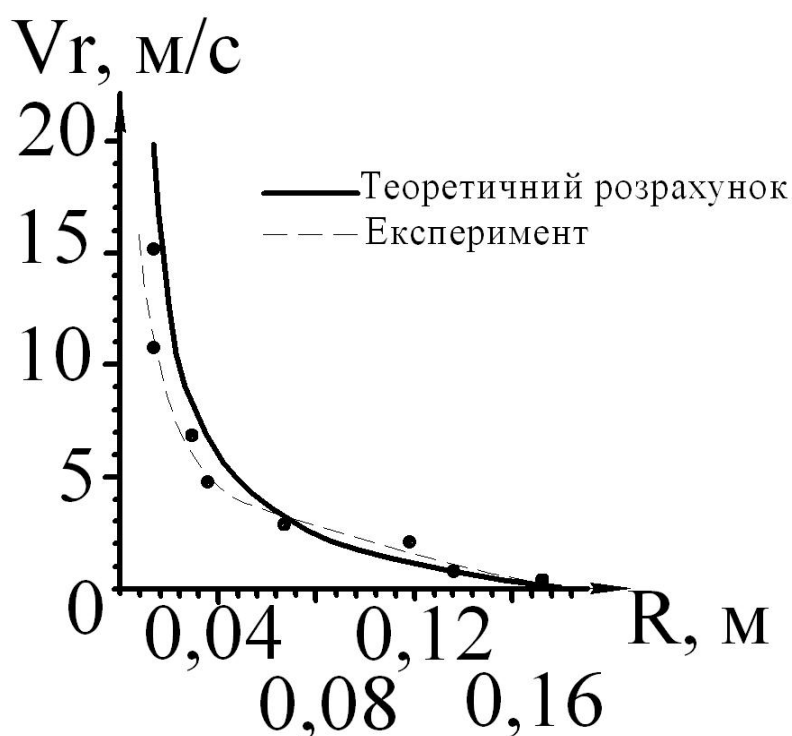


Рис. 5.8. Зіставлення даних по радіальній швидкості газового потоку, отриманих теоретичними розрахунками та експериментальним шляхом (при $\alpha=13^\circ$, $z=0,8$ м).

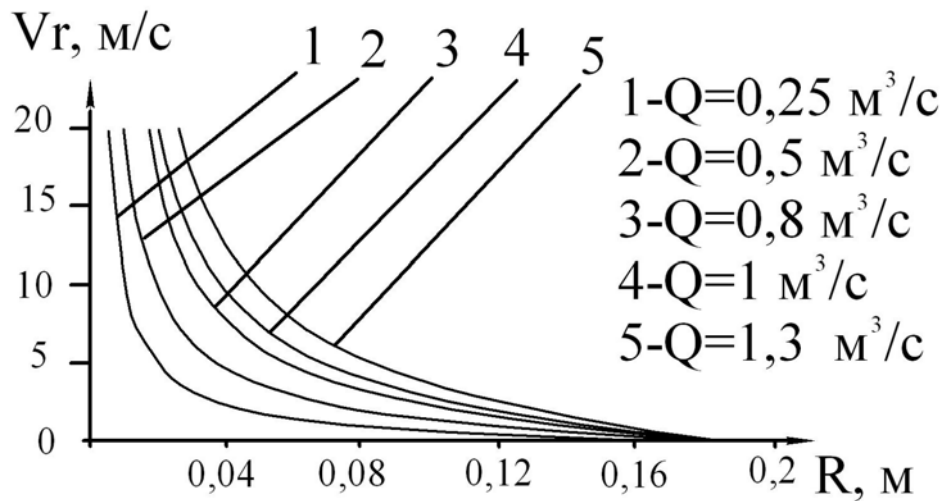


Рис. 5.9. Розрахунковий характер зміни радіальної швидкості газового потоку залежно від витрати газового потоку (Q) (при $\alpha=13^\circ$, $z=0,8$ м).

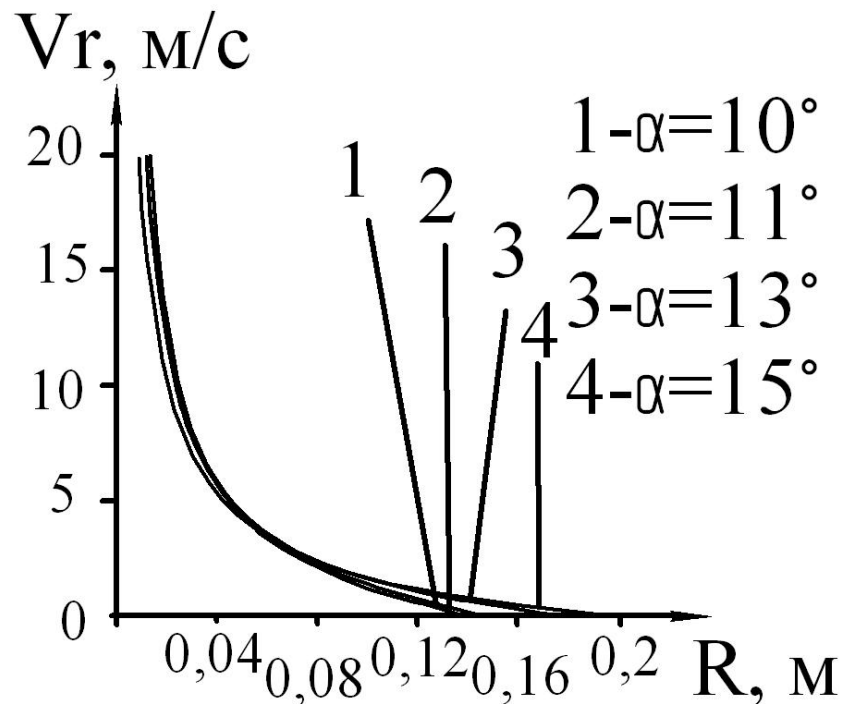


Рис 5.10. Розрахунковий характер зміни радіальної швидкості газового потоку залежно від кута розкриття конуса (φ) (при $Q=0,63$ м³/с, $z=0,8$ м).

У цілому в наведених функціональних залежностях для кожної зі складових швидкості газового потоку простежується одна і та ж якісна закономірність, але кількісна характеристика дещо незбігається. Для витратної та радіальної складових швидкості газового потоку за початкових умов та зміни наборо-

ру геометричних та технологічних умов не викликає такої суттєвої зміни кількісного значення розподілу по радіусу і висоті, як для колової складової швидкості газового потоку.

Характер вихроутворення максимально наочно демонструється в місці виходу газового потоку з розподілювача.

На базі аналізу гідродинамічних властивостей газового потоку залежно від набору змінних параметрів стає можливим раціональний підбір геометрії робочого простору вихрового гранулятора (кут розкриття α та висота z).

5.2. Аналіз результатів теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень руху гранул у робочому просторі вихрового гранулятора

Визначення характеру руху гранул під дією газового потоку у робочому просторі вихрового гранулятора проводилося на базі відеозйомки та замірів гідродинамічних показників роботи гранулятора. На базі розв'язання рівнянь гідродинаміки газового потоку та складання балансу сил, що діють на частку у вихровому газовому потоці (розділ 3), створено комплексний алгоритм визначення положення частинки в межах робочого простору гранулятора.

У вихровому грануляторі, що досліджується, енергія теплоносія витрачається на подолання сили тертя та на створення закрученого потоку дисперсного матеріалу. На визначеній висоті робочого об'єму вихрового гранулятора ($\approx 0,8H$) дисперсний матеріал зависає та знаходиться на цій висоті довгий час унаслідок того, що осьова швидкість стає меншою за швидкість витання гранули. Частинки меншого розміру (1–2 мм) відводяться з робочого простору вихрового гранулятора, частинки більшого розміру (≥ 2 мм) будуть знаходитись на визначеній висоті. За умови рівності швидкостей дисперсної та несучої фази частинки рухаються до відповідного патрубку. Частинки дисперсної фази, що зосередились на визначеному рівні, знаходяться там до моменту, коли за рахунок тертя їх з твердою стінкою та взаємних контактів з сусідніми частинками і пакетами частинок, а також унаслідок зменшення густини частка почне виноситися до відповідного патрубку.

Частинки твердої фази рухаються по аналогічній траєкторії з газовим потоком, але з меншою швидкістю, тобто за однаковий проміжок часу дисперсна фаза проходить шлях менший, ніж суцільна.

За допомогою візуального спостереження «мічених» частинок визначається траєкторія, яку вони набувають у міру взаємодії з газовим потоком та контакту між собою. Відзначені характерні траєкторії руху частинок у горизонтальній та вертикальній площині.

Миттєва картина течії в робочому просторі вихрового гранулятора зображена на рис. 5.11. Із зображення видно, що рух гранул має складну упорядковану структуру. У цілому в робочому просторі вихрового гранулятора виділено декілька зон: 1) зона створення вихрового потоку; 2) центральна зона фонтануючого типу, де гранули набувають висхідного потоку та наближаються до пристрою для розпилення і після контакту з рідкою фазою переміщуються в бік периферії в зону $r=(0,3-0,4)R$; 3) зона комбінованого зваженого шару $r=(0,4-0,5)R$, куди надходять гранули після контакту з рідким матеріалом 4) зона вихрового зваженого шару $r=(0,5-0,75)R$, де відбувається спіралеподібний рух гранул вздовж вертикальної осі; 5) зона зменшення інтенсивності руху гранул, де доцільно розташувати пристрій для розвантаження вихрового гранулятора.

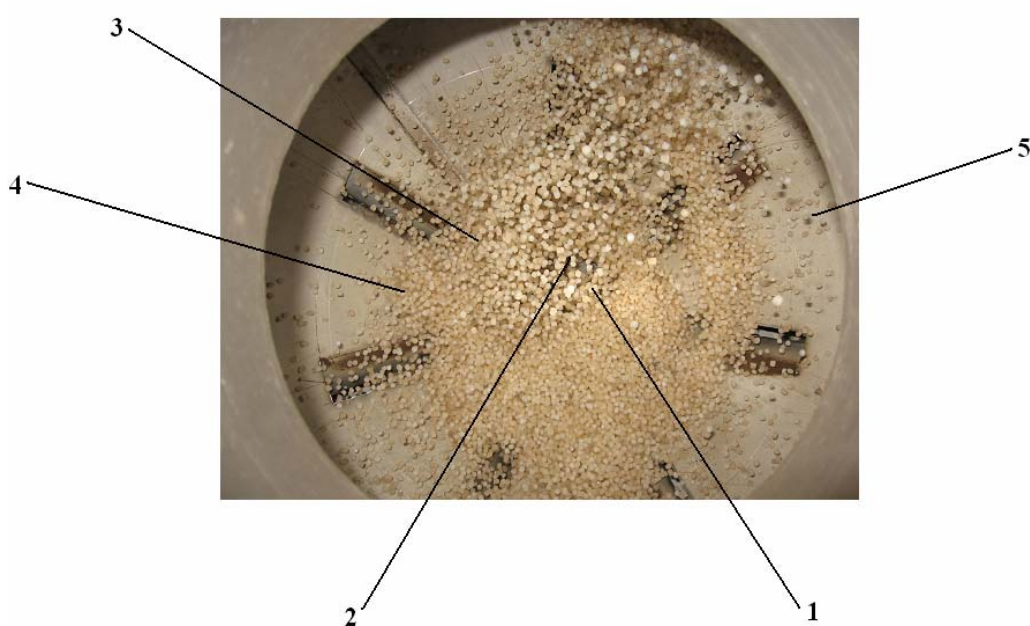


Рис. 5.11. Зони руху гранул у вихровому грануляторі.

У разі зменшення навантаження висхідного газового потоку спостерігається застійна зона (рис. 5.12), яка відповідає мінімальному значенню швидкості, наведеної на рис. 5.3, котра усувається додатковим закрученням газового потоку газорозподільним пристроєм №3 (рис. 2.4, в).



Рис 5.12. Утворення застійної зони (збільшено).

Вихрові утворення в робочій зоні гранулятора мають тривимірну структуру, тому дослідити їх стає вкрай важко. У цьому разі використовуються миттєві знімки, на які розбито відеозйомку руху гранул, та проходить їх накладання з метою дослідження еволюціонування вихрів у часі та просторі. Картину створення вихрового руху гранул наведено на рис. 5.13.

Аналіз картини створення вихрового потоку гранул підтверджує рекомендації щодо розміщення пристрою для розпилення за висотою та радіусом. Максимально наочно усталений вихровий зважений шар продемонстровано на рис. 5.13 є, ж. Підтвердження можливості створення застійних зон проілюстровано на рис. 5.13 б, в.

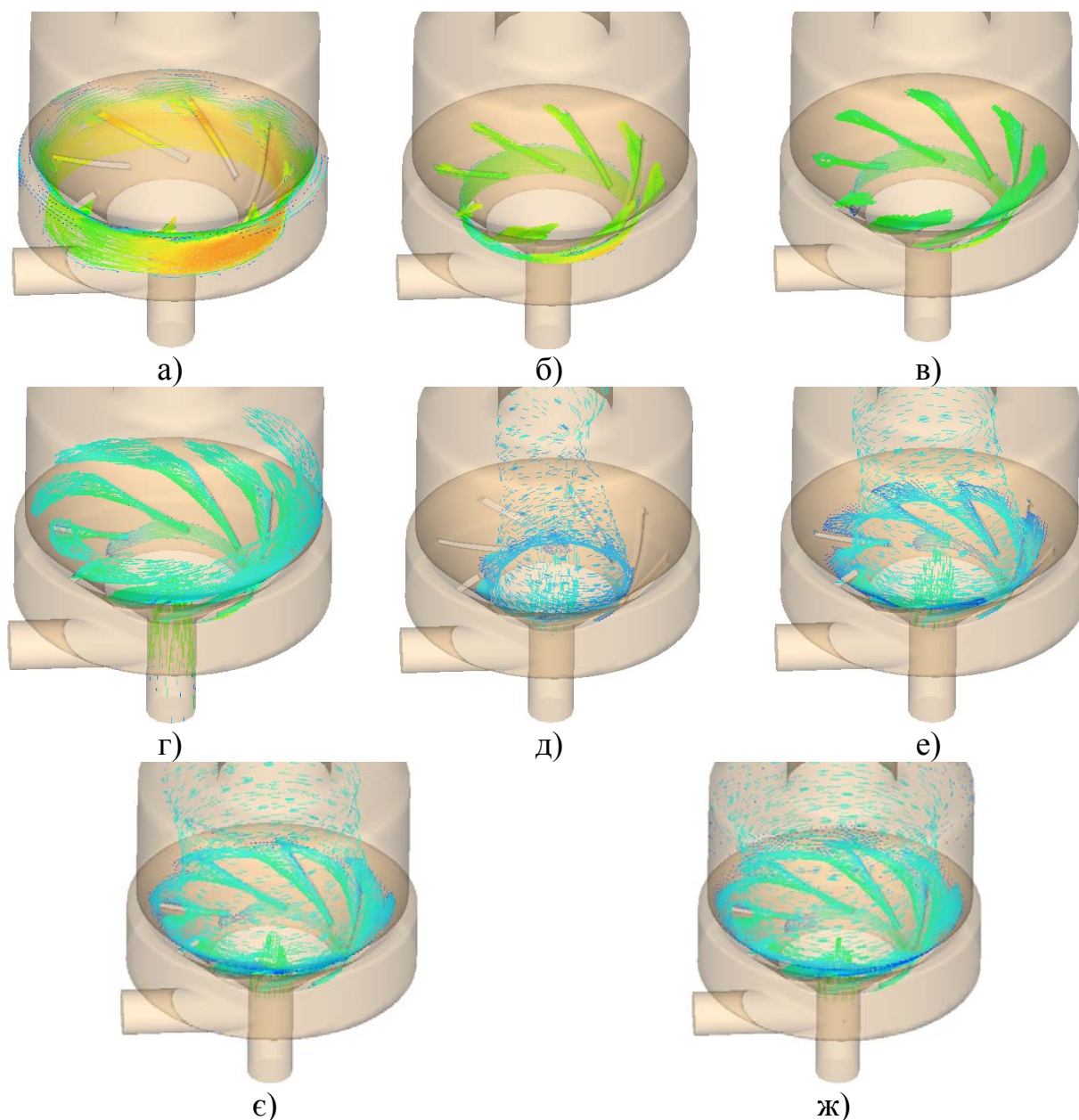


Рис. 5.13. Утворення вихрового руху гранул.

Траєкторія руху гранул, поля швидкостей газового потоку та гранули обумовлюють час перебування гранули у робочому просторі вихрового гранулятора. Цей час повинен бути достатнім, щоб крапля розчину (розплаву) повністю пройшла етап кристалізації. Аналіз траєкторії руху гранули за початкових умов та набору геометричних та технологічних характеристик (рис 5.14) дозволяє визначити їх вплив на зміну траєкторії гранули та мінімально необхідний час її перебування в робочому просторі апарата.

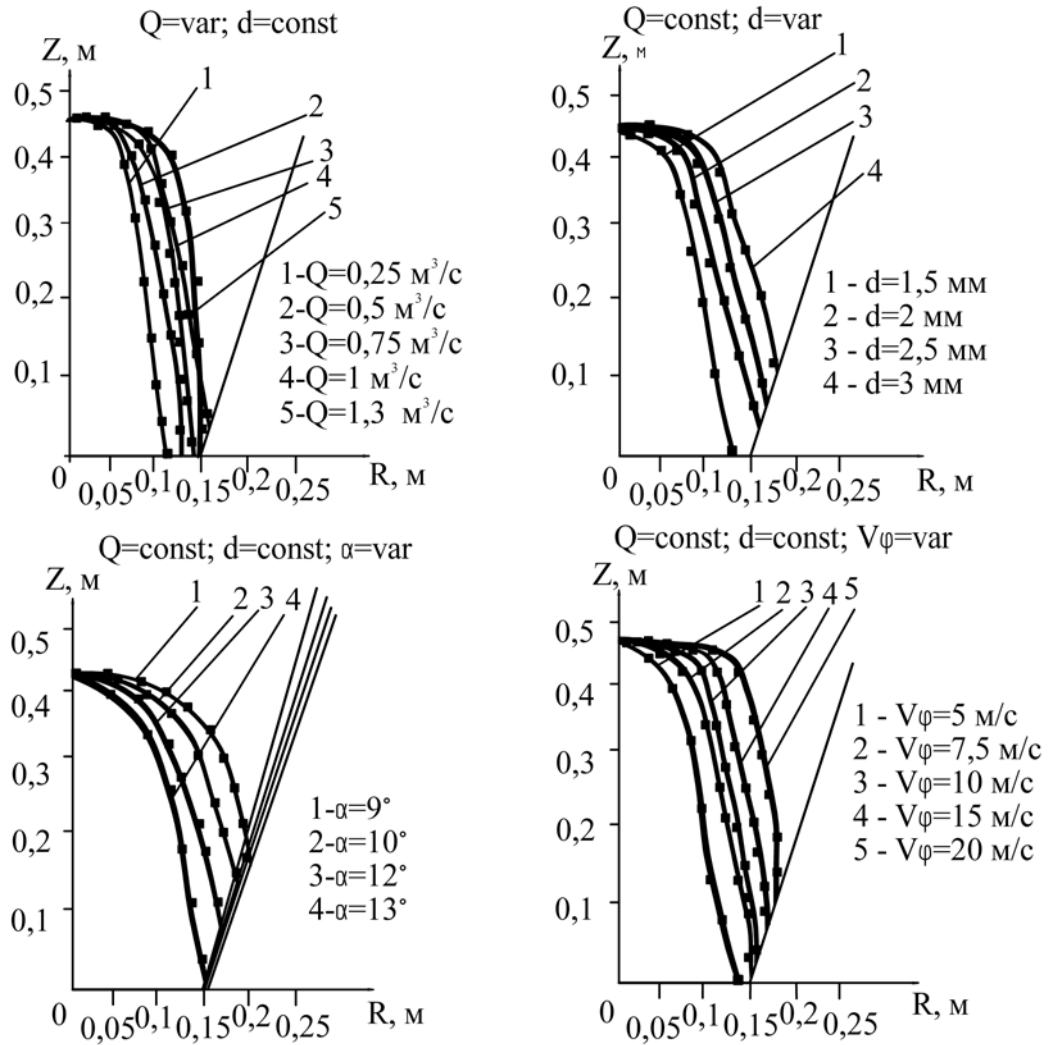


Рис. 5.14. Розрахункові траєкторії руху гранул за різних геометричних та технологічних умов.

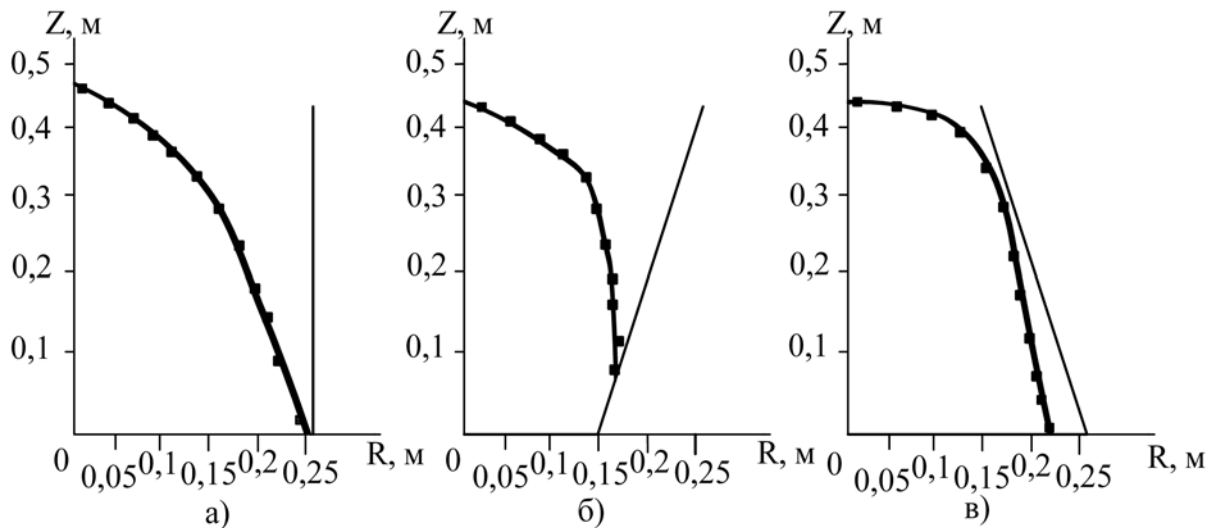


Рис. 5.15. Порівняльна розрахункова траєкторія руху гранули за різної конфігурації робочого простору апарата: а) циліндричний апарат; б) дифузор; в) конфузор.

Аналіз рис. 5.15 дозволяє виділити зони зменшення вертикального та горизонтального переміщення та зони, в яких це значення збільшується. Для циліндричного апарата (рис. 5.15, а) спостерігаються постійність та рівномірність переміщення краплі вздовж вертикальної та горизонтальної осей унаслідок постійного значення витратної складової швидкості газового потоку по висоті робочого простору гранулятора. У міру наближення до нижнього перерізу робочого простору крапля кристалізується та втрачає частину вологи і маси. Тому газовий потік сприяє деякому уповільненню руху краплі вздовж вертикальної осі.

Для конічних апаратів залежно від конфігурації робочого простору картина руху гранули змінюється порівняно з робочим простором постійного перерізу. У дифузорі (рис. 5.15, б) на початковому етапі внаслідок мінімального значення витратної складової швидкості газового потоку в верхньому перерізі та максимальної маси краплі переміщуються вздовж вертикальної осі швидше, ніж у нижньому перерізі, де рух краплі уповільнюється завдяки збільшенню витратної складової швидкості газового потоку та зменшення маси краплі внаслідок видалення з неї частини вологи.

У конфузорі (рис. 5.15 в) спостерігається зворотна картина. При вильоті крапля рідкого матеріалу, що має максимальну масу, попадає в зону мінімальної площі перетину робочого простору апарата (зону максимальної витратної швидкості газового потоку). При цьому її рух уздовж вертикальної осі уповільнюється. У міру переміщення до нижнього перерізу крапля надходить до зон з меншою витратною швидкістю газового потоку і при цьому паралельно зменшується в масі. Тому впродовж всього часу перебування краплі в робочому просторі апарата його гідродинаміка сприяє уповільненню її руху.

Для підтвердження результатів дослідження проведено порівняльний аналіз часу перебування краплі в робочому просторі апарата зваженого шару з різною конфігурацією робочого простору та різною організацією руху газового потоку для створення зваженого шару і порівняльний аналіз висот апаратів. Результати аналізу наведено в табл. 5.1. та 5.2.

Таблиця 5.1

Порівняльна характеристика часу перебування краплі в робочому просторі різних типів апаратів зваженого шару

Тип обладнання	Середній фактичний час перебування, с
Циліндричний гранулятор зваженого шару	180
Конічний гранулятор зваженого шару	220
Циліндричний гранулятор вихрового зваженого шару	230
Конічний вихровий гранулятор зваженого шару (дифузор)	400
Конічний вихровий гранулятор зваженого шару (конфузор)	450

Таблиця 5.2

Порівняльна характеристика висоти апарата, необхідного для забезпечення часу [115, 116] повної кристалізації краплі

Тип обладнання	Орієнтовна висота, м
Грануляційна вежа	50-70
Циліндричний вихровий гранулятор	10-15
Конічний вихровий гранулятор	6-9

5.3 Зіставлення результатів експерименту та моделювання гідродинаміки газового потоку за допомогою програмних продуктів COSMOS FlowWorks 2006 Pre-Release та FlowVision 2003 demo

Зіставлення результатів фізичного та математичного моделювання показало, що загальна картина руху гранул у робочому просторі вихрового гранулятора відповідає полю швидкостей потоку, отриманого за допомогою програмних про-

дуктів COSMOS FlowWorks 2006 Pre-Release [108] та FlowVision 2.2 [109] для кожного з газорозподільних пристроїв, які досліджено експериментально.

Отримані результати підтверджують експериментальні дослідження та можливість застосування газорозподільних пристроїв №1-3 для створення рівномірного закрученого потоку. Поле швидкості для газорозподільного пристрою №1 (рис 5.16) розміщено по перерізу робочого простору вихрового гранулятора достатньо симетрично (це пояснюється тим, що газорозподільний пристрій №1 має повністю перфороване полотно), але нерівномірно та з різкими піками вздовж радіуса вихрового гранулятора.

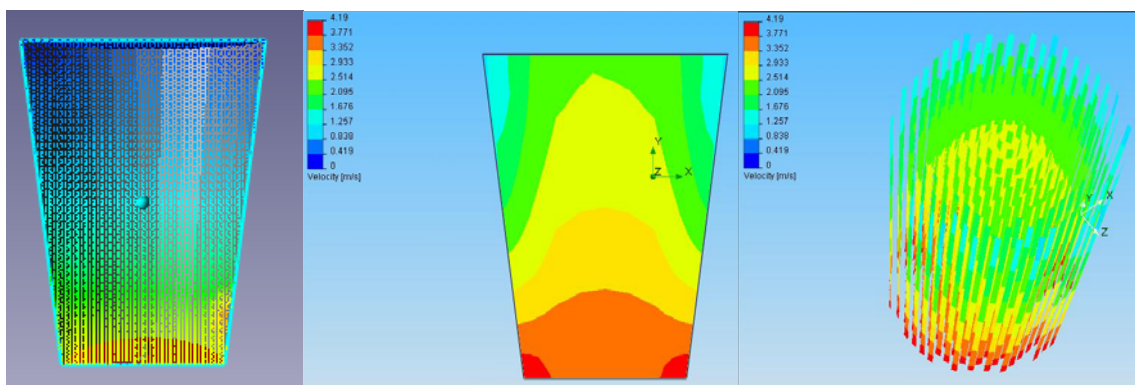


Рис. 5.16. Заливка поля швидкостей газового потоку для газорозподільного пристрою №1.

Поле швидкості для газорозподільного пристрою №2 (рис. 5.17) має несиметричний характер у робочому просторі вихрового гранулятора, спостерігаються піки непостійного характеру та місця розміщення, що підтверджено експериментом. Значення швидкості коливається в широкому діапазоні. Це пояснюється тим, що дві лопатки, які має в своїй конструкції газорозподільний пристрій №2, не дозволяють створити інтенсивний вихровий рух газового потоку, адже енергія закрученого потоку, що надходить до робочого простору вихрового гранулятора, згасає внаслідок взаємодії з висхідним потоком газу, який надходить крізь перфоровану частину газорозподільного пристрою №2. Таким чином, рух газового потоку набуває неусталеного характеру зі спонтанним ви-

никненням вихрив у центрі робочого простору при їх несиметричності та з зонами зниження швидкості руху у міру наближення до твердої стінки.

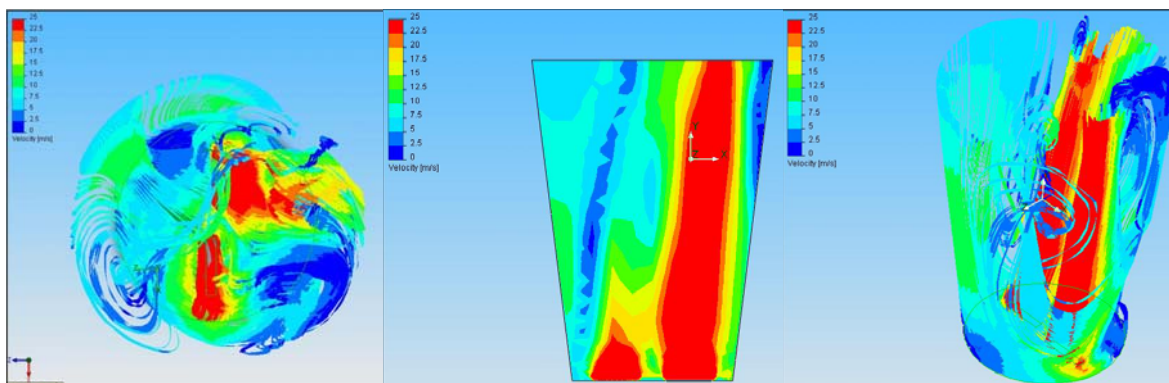


Рис. 5.17. Заливка поля швидкостей газového потоку для газорозподільного пристрою №2.

Для газорозподільного пристрою №3 (рис. 5.18) визначено характерні зони зворотного вихрового руху, що відповідає дійсності та спостерігається при виході гранулятора на робочий режим. У той же час виявлено окремі зони руху гранул, де основні гідродинамічні характеристики відмінні від отриманих комп'ютерним моделюванням. Така картина пояснюється тим, що в існуючих математичних моделях, які покладені в основу програмних продуктів, зокрема в COSMOS FlowWorks 2006 Pre-Release та FlowVision 2.2, не розроблена модель руху частинок із урахуванням особливостей гідродинаміки вихрового псевдозрідженого шару, що сприяє визначенню особливостей руху гранул та адаптації основних рівнянь гідродинаміки для конкретного процесу та типу апарата. Саме за таких умов стає можливим комплексний опис гідродинаміки робочого об'єму вихрового гранулятора.

Зіставлення результатів моделювання за допомогою програмних продуктів COSMOS FlowWorks 2006 Pre-Release та FlowVision 2.2 і експерименту дає задовільні результати. Як видно з ілюстрацій полів швидкостей газového потоку в характерних перерізах вихрового гранулятора, одержаних у результаті моделювання за допомогою програмних продуктів COSMOS FlowWorks 2006 Pre-Release та FlowVision 2.2 і експерименту, швидкість руху потоку більше, ніж у

звичайному апараті зваженого шару, але при цьому застосування саме вихрового зваженого шару дозволяє без збільшення віднесення часток значно збільшити швидкості газової фази.

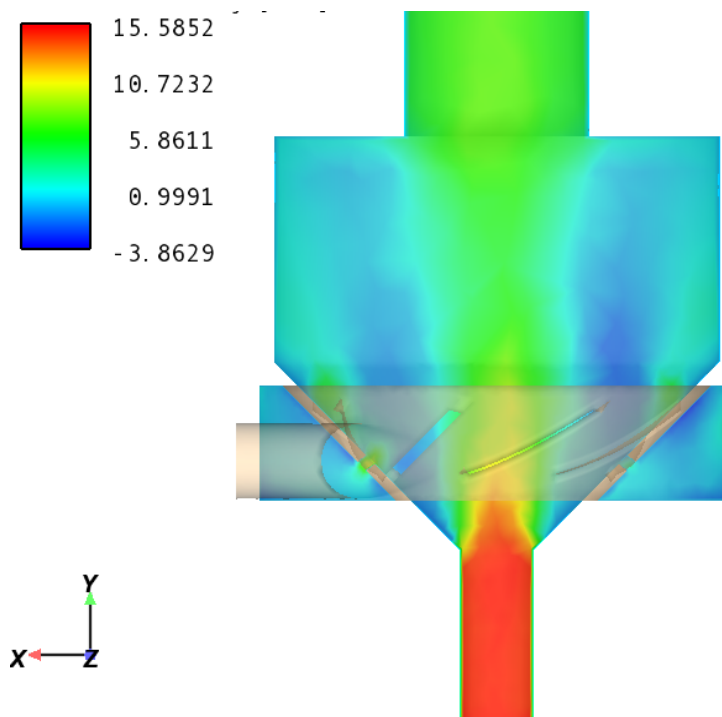


Рис. 5.18. Заливка поля швидкостей газового потоку для газорозподільного пристрою №3.

5.4 Інженерна методика розрахунку грануляторів вихрового типу

Інформація для розрахунку апаратів зі зниженою висотою польоту гранул охоплює широкий спектр питань. Необхідно знати властивості фаз, гранулометричний склад дисперсної фази, витрати матеріальних потоків, теплофізичні властивості фаз і т.п. У загальному випадку інженерна методика розрахунку тепломасообмінних апаратів наведена на рис. 5.19.

Отримані теоретичні висновки (розділ 3) та результати експерименту (розділ 4) в поєднанні із зіставленням їх між собою та результатами ряду літературних джерел у цій галузі (розділ 1) стають підґрунтям для створення методики інженерного розрахунку апаратури вихрового типу стосовно до процесів гранулоутворення з внесенням змін та уточнень в існуючі алгоритми з метою

отримання основних технологічних та геометричних характеристик розробленого вихрового гранулятора.

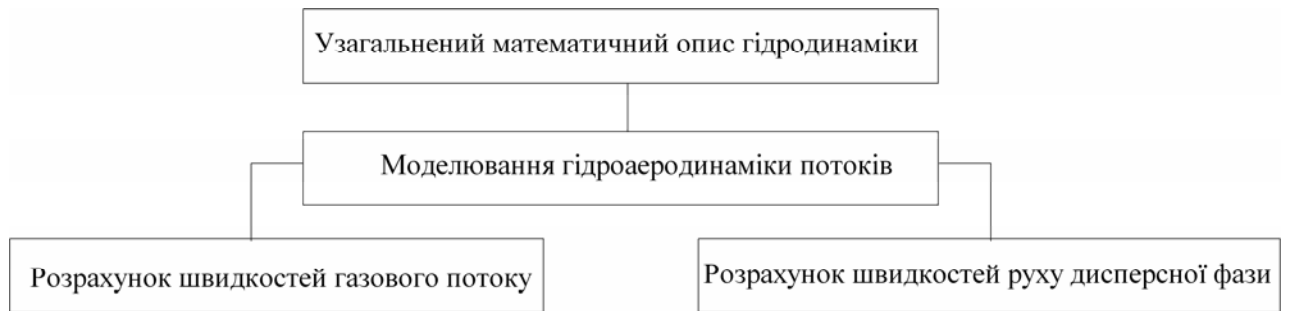


Рис. 5.19. Основні етапи розроблення методики інженерного розрахунку гідродинаміки потоків у вихровому грануляторі [117].

Основні етапи розрахунку режиму роботи вихрового гранулятора та визначення геометричних характеристик запроєктованого обладнання зведено до такого алгоритму [175]:

– задання початкових характеристик процесу гранулювання (навантаження по фазах, фізико-хімічні властивості фаз, вибір термодинамічного та гідродинамічного режиму відповідно до задання та ін);

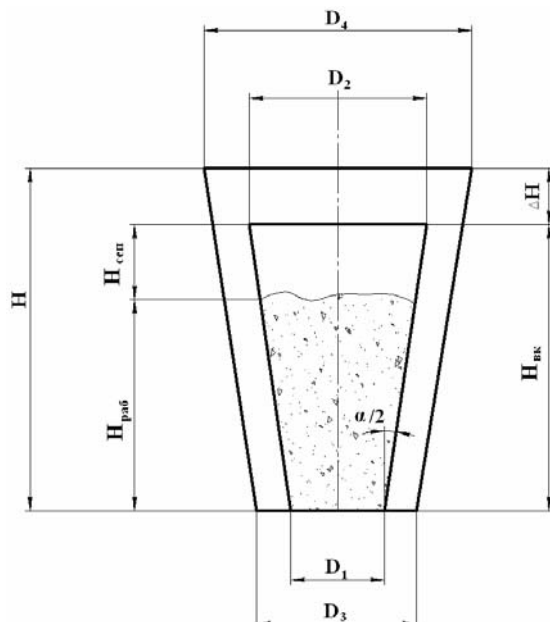


Рис. 5.20. До визначення основних геометричних елементів гранулятора:

D_1, D_2 – діаметри внутрішнього конуса;

D_3, D_4 – діаметри основного конуса;

α – кут розкриття внутрішнього конуса;

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

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

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

H – загальна висота основного конуса.

– загальні характеристики конструкції апарата (вибір газорозподільного пристрою, характеру введення газового потоку в робочий простір гранулято-

ра, співвідношення витрат газової фази на створення тангенційного та висхідного потоків і т.д.);

- розрахунок газового потоку з визначенням складових повної швидкості;
- визначення діаметра крапель, що надходять до робочого простору гранулятора пристрою для розпилення;
- отримання полей швидкостей газового потоку та визначення гідродинамічних характеристик дисперсної фази з урахуванням закону збереження моменту кількості руху [148];
- перевірка значень результатів обчислення складових повної швидкості в межах розрахункової сітки;
- визначення технологічних параметрів (крім заданих), геометрії вихрового псевдозрідженого шару та діапазону його існування;
- отримання основних розмірів робочої камери вихрового гранулятора (рис. 5.20);
- визначення гідродинамічного опору гранулятора та перевірка ефективності його функціонування.

Алгоритм комплексного гідродинамічного та інженерного розрахунків вихрового гранулятора наведено в додатку А.

5.5. Застосування розробленої методики у промисловості

5.5.1 Опис дослідно-промислової установки

На базі науково-дослідної лабораторії кафедри «Процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв» Сумського державного університету згідно з тематичним планом науково-дослідних робіт «Дослідження вихрових грануляційних та масотеплообмінних пристроїв» та під час виконання робіт за темою «Відпрацювання технологічних і конструктивних параметрів вузла створення пористих гранул та видача вихідних даних для проектування установки одержання пористої аміачної селітри, розробка конструкторської документації на установку одержання пористої аміачної селітри (ПАС)» запро-

поновано та створено наступну схему отримання гранульованого продукту з використанням вихрового гранулятора (рис.5.21).

Схема функціонує таким чином.

Технологічне повітря подається газодувкою Г в калорифер Т, де відбувається його нагрівання для подальшого використання як теплоносія та зріджуючого агента створення вихрового зваженого шару. Нагріте повітря подається під газорозподільний пристрій вихрового гранулятора ВГ через відповідний штуцер. У верхню частину вихрового гранулятора псевдозрідженого шару як початкова сировина (центри кристалізації) подається ретур з бункера Б₁ в певній кількості, що забезпечується шнековим дозатором Д₁. Як ретур застосовуються тверді частинки стандартної гранульованої аміачної селітри (або будь-якого матеріалу) з розмірами гранул 2-3 мм або дрібні гранули аміачної селітри, що утворилися при роботі в самому грануляторі. У разі наплення матеріалу, що відрізняється за фізико-хімічними властивостями від ретура центрами майбутньої кристалізації є лише стандартні гранули.

Для приготування розчину (розплаву) вихідний продукт подається з бункера Б₂ шнековим дозатором Д₂ у змішувач С. До змішувача С також подається і вода. Змішувач обладнаний нагрівальною сорочкою для підігріву вихідного продукту і води. Обігрів ведеться водою. Потім розплав (розчин) проходить через фільтри Ф_{1,2}, де відбувається його очищення від механічних домішок, і за допомогою насоса Н₂ подається у відповідний штуцер гранулятора ВГ. Фільтрація розплаву необхідна для забезпечення стійкої роботи пристрою для розпилення (форсунки) і запобігання його забрудненню і забиванню.

Розпилювання рідкого матеріалу здійснюється за допомогою стислого повітря, що подається компресором К. З форсунки факел, що складається з крапель розплаву і повітря, рівномірно розподіляється по шару рухомих гранул (ретуру). У вихровому грануляторі зваженого шару відбувається процес гранулоутворення та плівкоутворення. Гранули готової продукції відводяться з нижньої частини гранулятора ВГ через відповідний штуцер. Гранули готового

продукту надходять в охолоджувач псевдозрідженого шару X, охолоджується там за допомогою повітря, що подається в апарат газодувками Γ_{2-4} , відводиться з охолоджувача і відправляється на пакування.

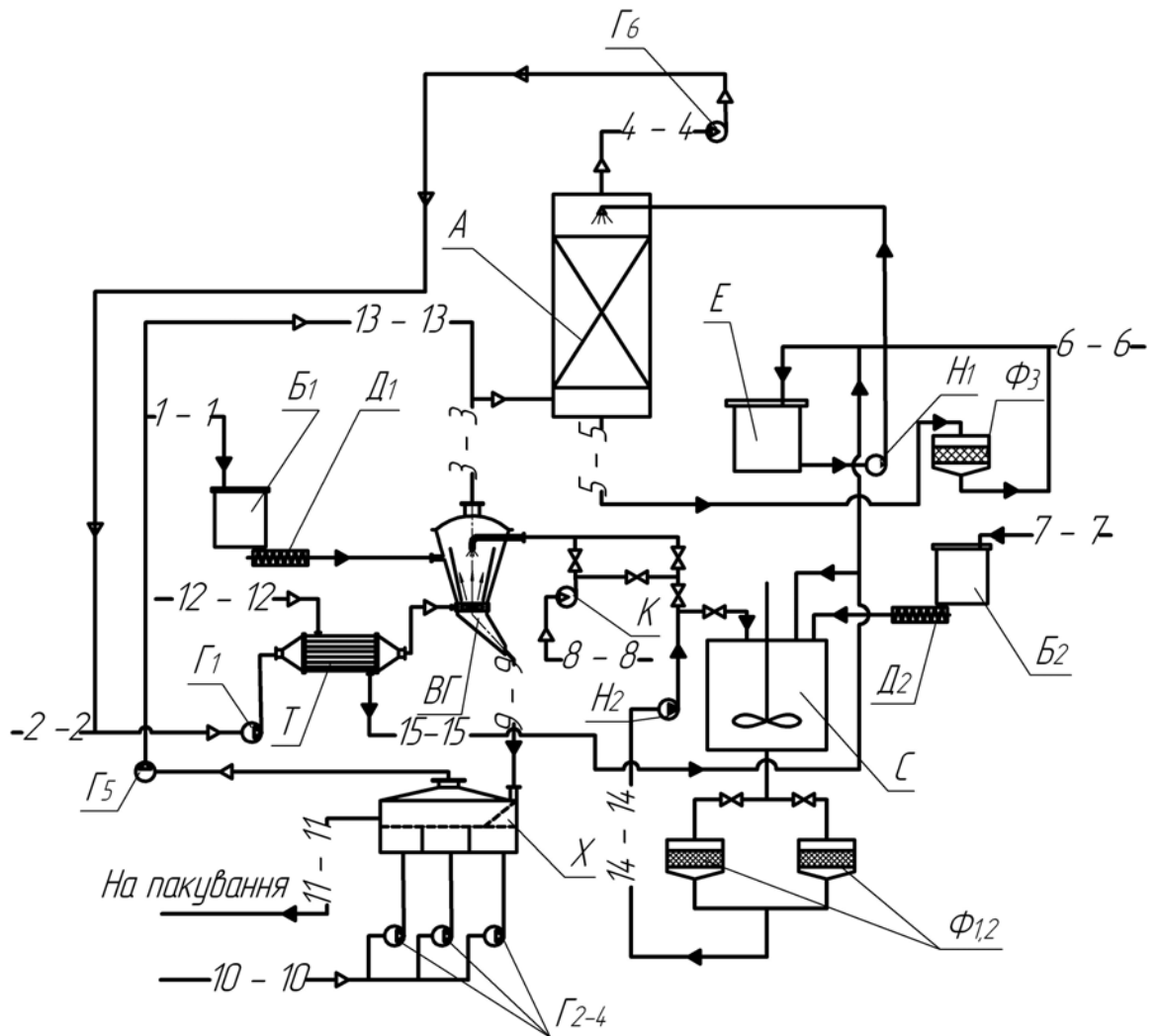


Рис. 5.21. Схема виробництва гранул з використанням вихрового гранулятора:

ВГ- вихровий гранулятор; Т – калорифер; X - охолоджувач; А – абсорбер; Ф – фільтр; С – змішувач; Д – дозатор; Б – бункер; Г – газодувка; Н – насос; Е – ємність; К – компресор;

1-1 – ретур; 2-2- технологічне повітря; 3-3 – забруднене повітря; 4-4 – очищене повітря; 5-5 - забруднена вода; 6-6 – вода; 7-7 – вихідний продукт; 8-8 – повітря на розпил розчину; 9-9 – продукт; 10-10 - повітря на охолодження продукту; 11-11 – продукт на пакування; 12-12 – пар; 13-13 – запилений газ; 14-14 – розчин; 15-15 – водяний конденсат.

Забруднене повітря, що йде з гранулятора, а також газ із охолоджувача псевдозрідженого шару, що містять пил і дрібні частинки, надходять в нижню частину абсорбера А за допомогою газодувки Γ_5 , де відбувається їх очищення зрошуваною водою. Забруднена вода з абсорбера розділяється на два потоки: одна частина потоку йде в ємність Е, де змішується з свіжою водою (в разі наплення матеріалом, що є основою речовини, що напилюється); інша частина подається в змішувач С для отримання розплаву. Вода на зрошування абсорбера подається за допомогою насоса H_1 з ємності Е.

Розроблена схема дозволяє отримувати на поверхні гранули шар пористої структури з будь-якого рідкого матеріалу, що стає передумовою створення дво- та багат шарових гранул в об'ємі одного пристрою. Наведена технологічна схема побудована таким чином, щоб забезпечити раціональне використання потоків повітря і води і максимально зменшити викиди забруднених потоків у навколишнє середовище.

Наведена схема розрахована на випуск 1500-4000 кг/добу гранульованого продукту з особливими властивостями. Корегування потужності установки та характеристики продукції відбувається залежно від показників вихідної сировини та потреб замовника. Як приклад на рис. 5.22 наведено матеріальний баланс вихрового гранулятора в складі установки потужністю $G_{\text{гр}}$ кг/добу з випуску готового продукту.

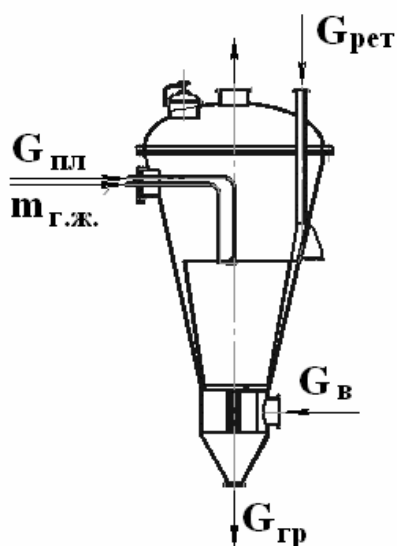


Рис. 5.22. Схема руху матеріальних потоків у вихровому грануляторі:

$G_{\text{гр}}$ - продуктивність апарата; $G_{\text{рет}}$ - кількість ретуру, що надходить до гранулятора; $G_{\text{пл}}$ - кількість розплаву на розпилення; $G_{\text{в}}$ - витрата теплоносія; $m_{\text{г.ж}}$ - витрата газу для пневматичного розпилення.

5.5.2. Результати дослідно-промислових випробувань

Для отримання якісних характеристик гранульованого продукту з особливими властивостями, окрім гідродинамічних показників роботи вихрового гранулятора зваженого шару, важливим є також і технологічні показники або їх комбінація [176]:

- час обробки гранули у вихровому псевдозрідженому шарі;
- кількість вологи у розчині;
- час сушіння гранули;
- температура сушіння гранули.

Для підтвердження відповідності отриманих наукових результатів при застосуванні їх у роботі промислового апарату наведено показники дослідження міцності гранул та їх гранулометричного складу від режиму роботи апарата (табл. 5.3).

Таблиця 5.3

Залежність міцності гранул, гранулометричного складу та конфігурації зваженого шару від гідродинамічного режиму обробки гранул

Номер досліджу	Швидкість обертання зваженого шару, м/с	Міцність гранули гр./гран.	Критерій Re	Примітка
1	16,99	406	2746	Вихровий закручений шар (гранулометричний склад – норма)
2	8,7	364	1406	Комбінований завислий шар (гранулометричний склад – норма)
3	7,6	186	1228	Комбінований завислий шар (значна кількість розколотих гранул)

Аналіз табл. 5.3 показує межі стабільного функціонування вихрового гранулятора (дослід 1 та 2) відповідно до отриманих гідродинамічних характеристик на експериментальному зразку апарата.

Нижче наведено деякі результати дослідження промислового зразка вихрового гранулятора та їх аналіз.

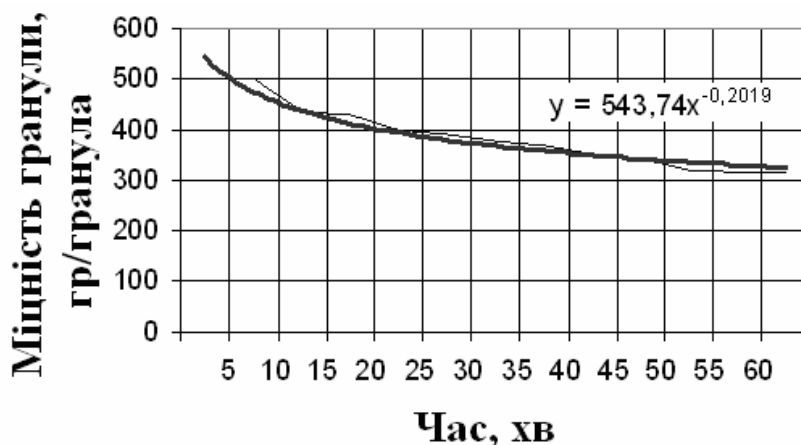


Рис 5.23. Залежність міцності гранул від часу їх перебування в грануляторі.

За результатами аналізу залежності, наведеної на рис. 5.23 визначено, що час перебування гранул у робочому просторі вихрового гранулятора зваженого шару лімітується періодом 15-20 хвилин. При такому періоді перебування гранули мають значення міцності, що відповідає нормативним вимогам.

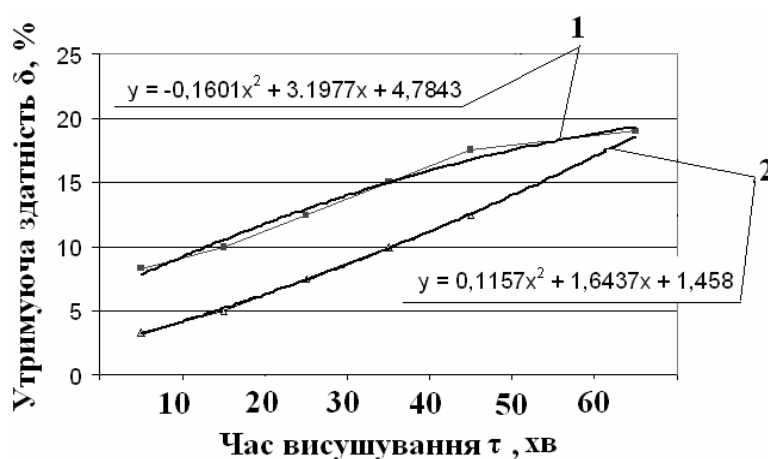


Рис 5.24. Залежність утримувальної здатності гранул від часу висушування в грануляторі: 1 – без проведення процесу класифікації; 2 – за умови проведення процесу класифікації.

При зіставленні даних, наведених на рис. 5.23 та 5.24, з'ясовано, що при перебуванні гранули у робочому просторі вихрового гранулятора визначений термін значення утримувальної здатності відповідає нормативним показникам. Розбіжність у значеннях утримувальної здатності для класифікованих і некласифікованих гранул пояснюється тим, що широкий діапазон гранулометричного складу продукції передбачає наявність гранул дрібної фракції, кількість якої перевищує встановлену стандартами. Унаслідок цього гранули дрібної фракції руйнуються та поглинають більшу кількість рідини завдяки збільшенню питомої поверхні. Особливості конструкції робочого простору вихрового гранулятора (розділ 3) дозволяють отримати монодисперсні гранули товарної фракції заданого розміру. Тому наведений апарат вирішує проблему додаткового встановлення пристроїв для класифікації гранул. Крім того, за результатами експерименту (розділ 4) встановлено зону максимальної інтенсивності роботи гранулятора, куди і рекомендується подавати рідкий матеріал. Відведення гранул товарної фракції відбувається з нижнього перерізу зазначеної зони.

Зіставлення результатів промислового випробування вихрових грануляторів з іншими типами грануляційного обладнання наведено табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Порівняльна характеристика показників продукції, отриманих за допомогою різних типів обладнання

Тип обладнання	Продукція	Поглинаюча здатність δ , %	Міцність F, гр./гран.
Тарілчастий гранулятор	Аміачна селітра	4,5	320
Грануляційна вежа	Аміачна селітра	7,6	200
Вихровий гранулятор	Аміачна селітра	10	450

З табл. 5.4 видно, що з наведеної продукції повною мірою показникам якості $\delta=5,6\%$ та $F=350-400$ гр/гранулу відповідає зразок, отриманий у вихро-

вому грануляторі зваженого шару. Інші зразки мають лише один показник якості, що відповідає стандартам, або такі показники зовсім відсутні.

Таблиця 5.5

Показники якості продукції залежно від режиму роботи вихрового гранулятора

Номер проби	Продукція	Технологічний режим	Зволожувач	Поглинаюча здатність δ , %
1	Аміачна селітра	$t=74^{\circ}\text{C}$ $\tau=15$ хв	40% розчин аміачної селітри	7,5
2	Аміачна селітра	$t=140^{\circ}\text{C}$ $\tau=15$ хв	40% розчин аміачної селітри	10
3	Аміачна селітра	$t=74^{\circ}\text{C}$ $\tau=15$ хв	вода	8
4	Аміачна селітра	$t=140^{\circ}\text{C}$ $\tau=15$ хв	вода	11

Примітка: гідродинамічний режим функціонування вихрового зваженого шару відповідає оптимальному співвідношенню потоків теплоносія, отриманих в результаті експерименту (розділ 4.3). Підбір конструкції газорозподільного пристрою відповідає рекомендаціям розділу 4.2.

Аналіз табл. 5.5 дозволяє визначити оптимальний режим та діапазон регулювання технологічних параметрів роботи вихрового гранулятора зваженого шару для отримання продукції з визначеними стандартом показниками якості.

На рис. 5.25 наведено креслення вихрового гранулятора, який розроблений на базі оптимального інженерного розрахунку, алгоритм якого наведено в розділі 5.4.

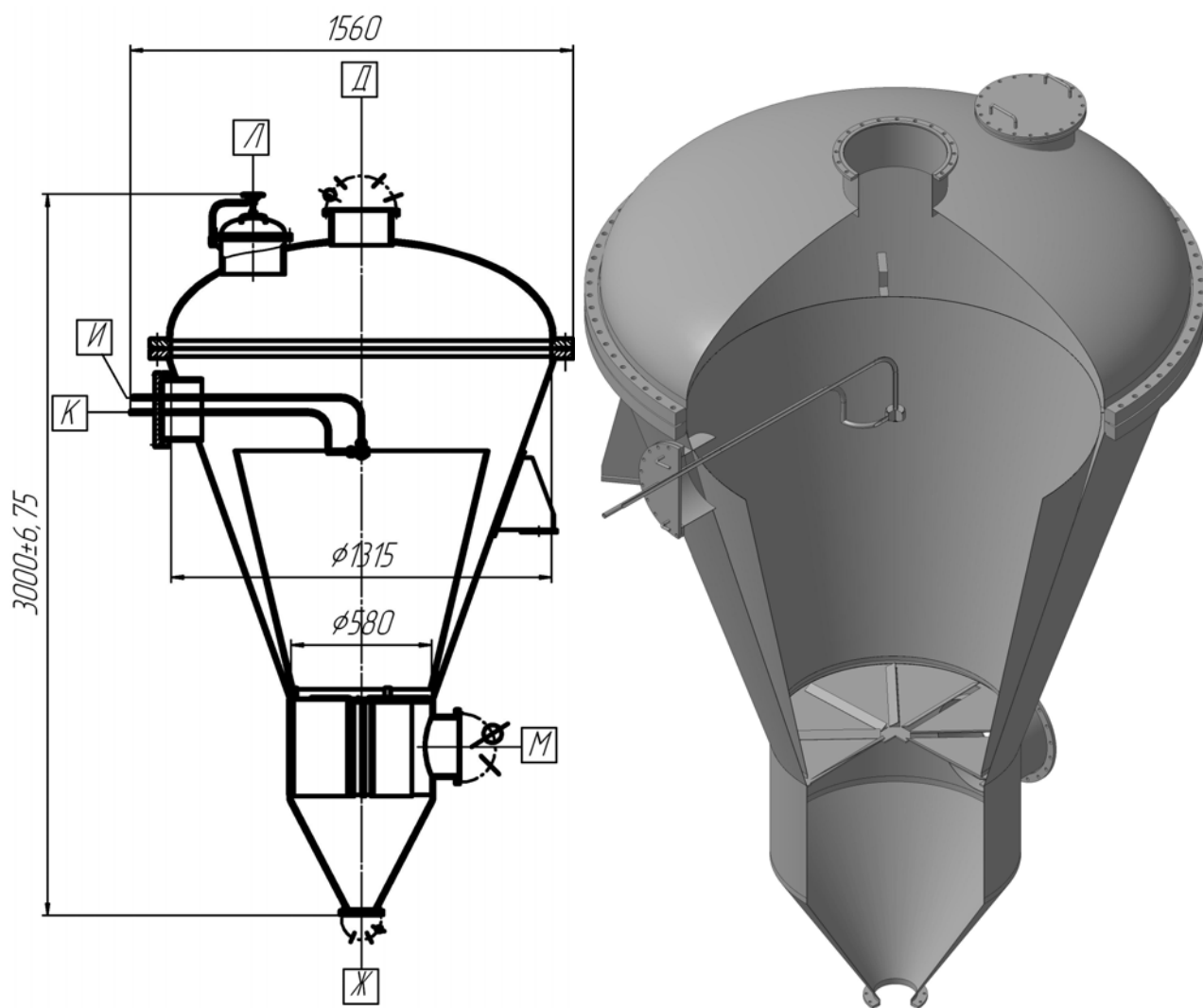


Рис 5.25. Промисловий зразок вихрового гранулятора зваженого шару.

5.6. Висновки до п'ятого розділу

1. Проведено порівняльний аналіз теоретичних значень складових швидкості газового потоку в робочому просторі вихрового гранулятора з експериментальними даними. Похибку результатів оцінено на рівні 4-5 %.

2. На підставі аналізу даних визначено місце встановлення пристрою для розпилення або групи пристроїв за радіусом, що забезпечить максимальну ефективність функціонування грануляторів при досягненні піка значення окремих складових повної швидкості газового потоку.

3. Визначено висоту робочого простору гранулятора, де доцільно встановити пристрій для розпилення на підставі отриманих результатів експерименту та порівняльного аналізу їх з результатами теоретичних залежностей.

4. Визначено вплив початкових, геометричних та технологічних умов (кут розкриття конуса, витрата газового потоку, початкове закручення потоку, конфігурація робочого простору) на траєкторію руху гранул у робочому просторі вихрового гранулятора та час їх перебування.

5. Зіставлення результатів моделювання за допомогою існуючих програмних продуктів та експериментальних даних визначило відмінності функціонування псевдозрідженого шару в грануляторі, що досліджено.

6. Розроблено методику розрахунку гідродинамічних параметрів робочого простору вихрового гранулятора та запропоновано орієнтовний технологічний розрахунок апарата.

7. Створено алгоритм визначення та оцінки показників роботи апарата.

8. Запропоновано нові способи проведення процесу гранулювання та нові конструкції грануляторів, що захищені патентами України.

9. Створено напівпромислову установку отримання гранул у вихровому зваженому шарі, яка в подальшому знайшла впровадження для отримання гранульованих продуктів з особливими властивостями.

10. Проведено порівняльний аналіз продукції, яку отримано в апаратах різних типів, з визначенням якісних показників продукції та доведено доцільність запровадження грануляторів вихрового зваженого шару в промисловість.

Основні наукові результати розділу опубліковані в роботах [165, 172, 175-185].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На підставі літературного огляду та аналізу гідродинамічних параметрів роботи грануляційних пристроїв різних типів виявлено недоліки існуючих конструкцій, визначено напрямки удосконалення та обґрунтовано можливість зменшення габаритних розмірів та висоти польоту гранули у вихрових апаратах. Доведено, що запропонована конструкція забезпечує високу ефективність процесу.

2. Розроблено математичну модель розрахунку гідродинамічних параметрів однофазного та двофазного вихрових потоків з можливістю отримання полей швидкостей потоків у довільній точці робочого простору вихрового гранулятора.

3. Експериментальним шляхом досліджено вплив конструктивних та технологічних параметрів на створення стабільного зваженого шару різноманітних конфігурацій з візуалізацією даних у вигляді фото та графічних залежностей основних гідродинамічних параметрів роботи гранулятора.

4. Проведено порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень, одержано гідродинамічні характеристики модельного та промислового зразків вихрового гранулятора.

5. На підставі комп'ютерного моделювання визначено особливості роботи вихрових апаратів та відмінності від класичних апаратів зваженого шару.

6. Розроблено методику розрахунку гідродинамічних показників вихрових грануляторів зваженого шару з визначенням основних гідродинамічних характеристик та методику інженерного розрахунку вихрового гранулятора.

7. Запропоновано нові способи гранулювання та нові конструкції грануляторів, які захищені патентами України. На базі аналізу результатів дисертаційної роботи проведено впровадження дослідженого апарата в технологічну лінію отримання гранульованих продуктів безбаштовим методом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Казакова Е.А. Гранулирование и охлаждение азотсодержащих удобрений / Казакова Е.А. – М.: Химия, 1980. – 288 с.
2. Казакова Е.А. Гранулирование и охлаждение в аппаратах с кипящим слоем / Казакова Е.А. – М.: Химия, 1973. – 152 с.
3. Производство аммиачной селитры в аппаратах большой единичной мощности / [Иванов М.Е., Поляков Н.Н., Поплавский В.Ю. и др.]; под ред. В.М. Олевского. – М.: Химия, 1990. – 288 с.
4. Технология аммиачной селитры / [Иванов М.Е., Поляков Н.Н., Стрижевский И.И. и др.]; под ред. В.М. Олевского. – М.: Химия, 1978. – 312 с.
5. Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот). Ч 2. / [Позин М.Е., Арсеньева Л.З, Каганович Ю.Я. и др.]. — Л.: Химия, 1974. – 768 с.
6. Классен П.В. Основы техники гранулирования (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) / П.В. Классен, И.Г. Гришаев – М.: Химия, 1982. – 272 с.
7. Классен П.В. Основные процессы технологии минеральных удобрений / П.В. Классен, И.Г. Гришаев – М.: Химия, 1990. – 304 с.
8. Классен П.В. Гранулирование / Классен П.В., Гришаев И.Г., Шомин И.И. – М.: Химия, 1991. – 240 с.
9. А.с. 631191 СССР, МКИ В01J2/04. Грануляционная установка / А.А.Вагин, В.А.Вагин, А.И.Юрченко, А.Д.Гочин, А.В.Киркин (СССР). – №2450420/23–26; заявл. 08.02.1977; опубл. 05.11.1978, Бюл. № 41.
10. А.с. 648058 СССР, МКИ В01J2/04. Способ получения гранул из расплавленного материала и устройство для его осуществления / Матис Виллем Пококбир, Кеес Ионккерс (Нидерланды). – №2108118/23–26; заявл. 01.02.1974; опубл. 15.02.1979, Бюл. № 6.
11. А.с. 687652 СССР, МКИ В01J2/04. Способ гранулирования расплава удобрений / В.З. Вильдавский, А.И.Кремер, Я.С. Шенкин (СССР). –

- №1668779/23–26; заявл. 07.06.1971; опубл. 30.06.1986, Бюл. № 24.
12. А.с. 782855 СССР, МКИ В01J2/04. Способ получения 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 (СССР). – №2655970/23–26; заявл. 25.02.1975; опубл. 30.11.1980, Бюл. № 44.
 13. 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 (СССР). – №2828595/23–26; заявл. 26.07.1979; опубл. 15.12.1981, Бюл. № 46.
 14. А.с. 1031493 СССР, МКИ В01J2/04. Устройство для гранулирования расплавов / В.Н.Сахаров, И.Н.Барышев, И.А.Егоров (СССР). – №3298318/23–26; заявл. 26.05.1981; опубл. 30.07.1983, Бюл. № 28.
 15. А.с. 1103892 СССР, МКИ В01J2/04. Способ гранулирования расплава и устройство для его осуществления / Б.Г.Холин (СССР). – №2753304/23 – 26; заявл. 17.04.1979; опубл. 23.07.1984, Бюл. № 27.
 16. 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 (СССР). – №3976837/31–26; заявл. 16.10.1985; опубл. 07.04.1988, Бюл. № 13.
 17. 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 (СССР). – №4011532/23–26; заявл. 22.11.1985; опубл. 07.04.1988, Бюл. № 13.
 18. А.с. 1428454 СССР, МКИ В01J2/04. Способ получения гранулированных материалов / Г.Н. Ластовцева, Г.С.Пащенко, Л.Б. Рольщиков (СССР). – №3879514/31–26; заявл. 28.03.1985; опубл. 07.10.1988, Бюл. № 37.
 19. А.с. 1428455 СССР, МКИ В01J2/04. Грануляционная установка / Н.Г.Кононов, В.Н.Кашинский (СССР). – №3909913/31–26; заявл. 11.06.1985; опубл. 07.10.1988, Бюл. № 37.

20. А.с. 1526801 СССР, МКИ В01J2/04. Способ гранулирования расплавов / В.В. Вейлерт, В.В.Сорокин, А.С.Виноградов, П.В. Шалин (СССР). – №4048603/31–26; заявл. 03.03.1986; опубл. 07.12.1989, Бюл. № 45.
21. 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 (СССР). – №4249903/31–26; заявл. 02.04.1987; опубл. 07.12.1989, Бюл. № 45.
22. А.с. 1560299 СССР, МКИ В01J2/04. Способ гранулирования расплавов/ В.В. Вейлерт, В.Я. Головин, П.В. Шалин (СССР). – №4323742/31–26; Заявлено 02.11.1987; Опубл. 30.04.1990, Бюл. № 16.
23. 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 (СССР). – №4440113/31–26; заявл. 14.06.1988; опубл. 15.12.1990, Бюл. № 46.
24. А.с. 1613159 СССР, МКИ В01J2/04. Установка для гранулирования расплавов / В.В. Вейлерт, П.В. Шалин, А.Л. Таран, А.С. Виноградов (СССР). – №4488040/31–26; заявл. 28.09.1988; опубл. 15.12.1990, Бюл. № 46.
25. 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 (СССР). – №4668272/26; заявл. 10.02.1989; опубл. 30.08.1991, Бюл. № 32.
26. А.с. 1701361 СССР, МКИ В01J2/04. Устройство для гранулирования расплавов / В.Н. Сахаров, Н.Г. Леваков, А.Н. Селезнев (СССР). – №4731000/26; заявл. 22.08.1989; опубл. 30.12.1991, Бюл. № 48.
27. 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.; заявитель и патентообладатель Laroche Industries Inc. – №280245; заявл. 25.07.1994; опубл. 07.05.1996.

28. Пат. № 9600610 Англия, МКИ В01J2/04. Способ и устройство для формирования частиц / Hanna Mazen, York Peter; заявитель и патентообладатель University of Bradford, Hanna Mazen, York Peter. – PST/GB95/01523; заявл. 30.06.1995; опубл. 11.01.1996.
29. Пат. № 9513864 Германия, МКИ В01J2/04. Способ и устройство для распылительной сушки и получения агломерированного порошка / Hansen Ove Emill; заявитель и патентообладатель Niro Holding A/S, Hansen Ove Emill. – PST/DK93/00376; заявл. 17.11.1993; опубл. 26.05.1995.
30. Хохлов Д.Л. Интенсификация процесса кристаллизации и охлаждения азотных удобрений в грануляционных башнях: дисс. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Хохлов Д. Л. – Сумы, 1995. – 98 с.
31. Асеев В.И. Теоретические основы работы и интенсификации грануляционных башен / Асеев В.И. – Тула, Приокское книжное изд-во, 1969. – 270 с.
32. Малкин Б.И. Теплообмен и механика в двухфазной системе при башенном гранулировании азотсодержащих удобрений: автореф. дисс. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.17.08 «Процессы и оборудование химической технологии» / Б.И. Малкин. – М., 1989. – 25 с.
33. Хохлов Л.А., Назаренко А.М., Хохлов Д.Л. Математическая модель процесса кристаллизации и охлаждения гранулы карбамида в потоке воздуха / Л.А. Хохлов, А.М. Назаренко, Д.Л. Хохлов // Химическое машиностроение: расчёт, конструирование, технология: сборник научных трудов СФТИ. – 1992. – С. 11–19.
34. Хохлов Д.Л., Хохлов Л.А., Назаренко А.М. Моделирование кристаллизации капель расплавов при переменной температуре на фазовой продукции / Д.Л. Хохлов, Л.А. Хохлов, А.М. Назаренко // Теоретические основы химической технологии. – 1995. – № 3. – С. 327–329.
35. Кононов А.В. Основы технологии комплексных удобрений / Кононов А.В., Стерлин В.Н., Евдокимова Л.И. – М.: Химия, 1988. – 320 с.

36. Любов Б.Я. Кинетическая теория фазовых превращений / Любов Б.Я. – М.: Металлургия, 1969. – 263 с.
37. Любов Б.Я. Теория кристаллизации в больших объёмах / Любов Б.Я. – М.: Наука, 1975. – 256 с.
38. Таран А.Л. Исследование процесса кристаллизации однокомпонентных расплавов методом электроаналогий: дисс. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Таран А.Л. – М., 1976. – 152 с.
39. Протодьяконов И.О. Явления переноса в химической технологии / Протодьяконов И.О., Марцулевич Н.А., Марков А.В.; под ред. Романкова П.Г. – Л.: Химия, 1981. – 264 с.
40. Матур К. Фонтанирующий слой / Матур К., Эпстайн Н.; пер. с англ. Мухлёнова И.П., Горштейна А.Е. – Л.: Химия, 1978. – 288 с.
41. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей / Френкель Я.И. – Ижевск: РХД, 2004. – 424 с.
42. Гусев А.И., Кучерявый В.И., Горловский Д.М. Прогнозирование высоты полёта капель карбамида в грануляционных башнях / А.И. Гусев, В.И. Кучерявый, Д.М. Горловский // Хим. промышленность. – 1978. – № 11. – С. 57–59.
43. Романков П.Г. Теплообменные процессы химической технологии / Романков П.Г., Фролов В.Ф. – Л.: Химия, 1992. – 288 с.
44. Stein W.A. Eine Naherungslosung fur das Erstarren von kugelformigen Korpern / W.A. Stein // *Verfahr. –Techn.* – 1971. – Bd. 5. – H. 11. – S. 453–457.
45. Stein W.A. Berecuung des Wärmeübergange im Spruhturm / W.A. Stein // *Chem. Eng. Techn.* 1971. – Bd. 43. – N. 11. – S. 1153.
46. Huber A., Klingst A. // *Z. Angew. Math. Mech.* – 1965. – Bd. 45. – H. 5. – S. 360.
47. Tao L.C. Generalized Numerical Solutions of Freezing a Saturated Liquid in Cylinder and Spheres / L.C. Tao // *AIChE J.* – 1967. – V. 13. – N. 1. – P. 165.

48. Таран А.В. Исследование процесса кристаллизации расплавов индивидуальных веществ с переохлаждением: дисс. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Таран А.В. – М., 1979. – 144 с.
49. Гельперин Н.И. Исследование процесса гранулирования аммиачной селитры в башнях методом электромоделирования / Н.И. Гельперин, Г.И. Лапшенков, А.Л. Таран // Хим. промышленность. – 1977. – № 3. – С. 205–209.
50. Таран А.Л., Кабанов Ю.М. Затвердевание гранул азотсодержащих удобрений при неравномерной по их поверхности интенсивности отвода тепла / А.Л. Таран, Ю.М. Кабанов // Теоретические основы химической технологии. – 1983. – Т. 17. – № 6. – С. 759–766.
51. Мещеряков Н.В., Артемьева Н.Н. Грануляция аммиачной селитры / Н.В. Мещеряков, Н.Н. Артемьева // Труды ГИАП. – 1957. – Вып. 8. – С. 8–132.
52. Бахтин Л.А. Использование статических грануляторов для интенсификации процесса в грануляционных башнях с псевдоожиженным слоем / Л.А.Бахтин // Хим. промышленность. – 1972. – № 5. – С. 47–50.
53. Долгалёв Е.В. Технология и аппаратурное оформление производства известково-аммиачной селитры в грануляционных башнях: дисс. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Долгалёв Е.В. – М., 2006 – 163 с.
54. Геронимус Я.Л. Теоретическая механика (очерки об основных положениях) / Геронимус Я.Л. – М.: Наука, 1973. – 512 с.
55. Кочетков В.Н. Гранулирование минеральных удобрений / Кочетков В.Н. – М.: Химия, 1975. – 224 с.
56. Расчёт оборудования для гранулирования минеральных удобрений / [Генералов М.Б., Классен П.В., Степанова А.Р., Шомин И.П.]. – М.: Машиностроение, 1984. – 192 с.
57. Давидсон И. Псевдоожижение / Давидсон И., Харрисон Д.; пер. с англ. Айнштейна В. Г., Гельперина Э. Н., Новобратского В.Л. – М.: Химия, 1974. – 728 с.

58. Козлов М.А. Исследование агломерации аммофоса с селекционированном аппарате кипящего слоя: дисс. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Козлов М.А. – Иваново, 2004. – 118 с.
59. Гельперин Н.И. Основы техники псевдооживления / Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. – М.: Химия, 1967. – 664 с.
60. Лева М. Псевдооживление / Лева М.; пер. с англ. Айнштейна В.Г. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 400 с.
61. Кунии Д. Промышленное псевдооживление / Д. Кунии, О. Левеншпиль; пер. с англ. под ред. Слинько М.Г. и Яблонского Г.С. – М.: Химия, 1976. – 448 с.
62. Сабадаш С.М. Дослідження процесу сушіння молока в сушарках з псевдооздріженим шаром / С.М. Сабадаш, О.Р. Якуба, В.В. Касянчук // Вісник Сумського національного аграрного університету. – 2008. – № 3(19). – С. 111-114.
63. Якуба О.Р. Інтенсифікація процесу сушіння харчових продуктів / О.Р. Якуба, М.Ю. Савченко // Вісник Сумського національного аграрного університету. – 2006. - № 10(11). – С. 140-144.
64. Ханик Я.М. Гідродинаміка і кінетика процесу сушіння дрібнодисперсних матеріалів у щільному шарі / Я.М. Ханик, В.М.Кузьма, О.В. Ковальчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 4. – С. 48-51.
65. Обезвоживание растворов в кипящем слое / [Каганович Ю.Я., Налимов С.П., Гольцинкер А.Д. и др.]; под ред. Тодеса О.М. – М.: Металлургия, 1973. – 288 с.
66. Dunlop D.D., Griffin L.J., Moser J.F. Particle size control in fluid cooling / D.D. Dunlop, L.J. Griffin, J.F. Moser // Chem. Eng. Progr. – 1958. – v.54. – № 8. – P. 39–43.
67. Lee B.S. Kinetics of particle growth in a fluidized caniner / B.S. Lee, J.J. Chu, A.A. Jonke // AIChE Journal. – 1962. – V. 8. – № 1. – P. 53–58.
68. Grimmer E.S. Kinetics of particle growth in the fluidized bed calcinations

- process / E.S. Grimmer // *AICHE Journal*. – 1964. – V. 10. – № 5. – P. 717–722.
69. Шахова Н.А. Кристаллизация плава мочевины в псевдооживленном слое с получением гранулированного продукта / Н.А. Шахова, А.И. Рачкова // *Химическая промышленность*. – 1963. – № 11. – С. 856–859.
70. Шахова Н.А. Математическая модель процесса образования пористых гранул в аппаратах с псевдооживленным слоем / Н.А. Шахова, В.В. Михайлов // *Химическая промышленность*. – 1975 – № 2. – С. 127–129.
71. Шахова Н.А. К расчёту гранулометрического состава двухслойных удобрений, получаемых в псевдооживленном слое / Н.А. Шахова, И.Г. Гришаев // *ТОХТ*. – 1973. – Т.7. – № 5. – С. 781–784.
72. Шахова Н.А. Кинетика гранулообразования при безроторном процессе в псевдооживленном слое / Н.А. Шахова, Н.М. Рагозина // *Массообменные процессы химической технологии*. – Л.: Химия. – 1967. – №3. – С. 77–79.
73. Шахова Н.А. Кинетика процесса гранулообразования в псевдооживленном слое / Н.А. Шахова // *Химическая промышленность*. – 1967. – № 6. – С. 459–462.
74. Natrantonis H., Goulas A., Kiparissides C. Comprehensive model for the prediction of particle-size distribution in catalyzed olefin polymerization fluidized-bed reactors / H. Natrantonis, A. Goulas, C. Kiparissides // *Chem. Engin. Science*. 1998. – V. 53 – №18. – P. 3251–3267.
75. Афанасьева Т.А. Исследование закономерностей агломерации и поведения агломератов в псевдооживленной системе газ-твёрдое тело: дисс. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Афанасьева Т.А. – Иваново, 1966. – 153 с.
76. Предварительная агломерация мелкокристаллических солей калия в процессе гранулообразования НРК-удобрений / В.А. Круглов, Л.Н. Овчинников, Н.И. Сухов и др. // *Изв. ВУЗ «Химия и химическая технология»*. – 1984. – т. 27. – № 11. – С. 1339–1342.

77. Тодес О. М. Аппараты с кипящим зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы / О. М. Тодес, О. Б. Цитович – Л.: Химия, 1981. – 295 с.
78. Пат. № 9614928 Италия, МКИ В01J2/16. Способ и устройство для получения и сушки сферических частиц / Rodrigues Lorenzo, Cini Maurizio; заявитель и патентообладатель G.S. S.R.L. Coating system, Rodrigues Lorenzo, Cini Maurizio – PST/IT95/00177; заявл. 06.11.1995; опубл. 23.05.1996.
79. Пат. № 9633009 Испания, МКИ В01J2/16. Способ и устройство для производства гранулятов посредством гранулирования напылением в псевдооживленном слое / Schuette Ruediger, Klasen Claas-Juergen, Bewersdorf Martin, Alt Hans-Christian; заявитель и патентообладатель Schuette Ruediger, Klasen Claas-Juergen, Bewersdorf Martin, Alt Hans-Christian. – PST/EP96/01453; заявл. 03.04.1996; опубл. 24.10.1996.
80. Пат. № 9513865 Германия, МКИ В01J2/16. Способ и устройство для получения агломерированного материала / Funder Christian Reedtz, Soerensen Jens Mourits, Hansen Morten Mohr; заявитель и патентообладатель Niro Holding, Funder Christian Reedtz, Soerensen Jens Mourits, Hansen Morten Mohr. – PST/DK94/00429; заявл. 15.11.1994; опубл. 26.05.1995.
81. 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 (СССР). – №1816402/26; заявл. 31.07.1972; опубл. 30.09.1976, Бюл. № 36.
82. А.с. №549166 СССР, МКИ В01J2/16. Аппарат для получения гранул в псевдооживленном слое / В.П. Солотовка, А.Ф. Дубовиченко (СССР). – №1984892/26; заявл. 03.01.1974; опубл. 05.03.1977, Бюл. № 9.
83. А.с. №889082 СССР, МКИ В01J2/16. Установка для гранулирования материалов / Г.И. Ефремов, В.А. Мельник, В.С. Сажин (СССР). – №2908068/23–26; заявл. 31.01.1980; опубл. 15.12.1981, Бюл. № 46.
84. А.с. 1223986 СССР, МКИ В01J2/16. Аппарат для гранулирования мате-

- риалов в кипящем слое / С.Г. Широкова, Л.Г. Грудзинский, Н.Н. Кретов, Л.Н. Овчинников, В.Н. Кисельников, А.Б. Иванов, М.Б. Иванов (СССР). – №3512887/23–26; заявл. 19.11.1982; опубл. 15.04.1986, Бюл. № 14.
85. 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 (СССР). – №3938663/30–26; заявл. 06.08.1985; опубл. 30.05.1987, Бюл. №20.
86. А.с. 1315010 СССР, МКИ В01J2/16. Устройство для капсулирования гранулированных и зернистых материалов / Г.А. Минаев, В.Д. Михайлик, С.В. Мищенко (СССР). – №3931896/31–26; заявл. 18.06.1985; опубл. 07.06.1987, Бюл. № 21.
87. 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 (СССР). – №3933886/31–26; заявл. 23.07.1985; опубл. 23.06.1987, Бюл. № 23.
88. 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 (СССР). – №3906259/30–26; заявл. 05.06.1984; опубл. 07.07.1987, Бюл. № 25.
89. 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 (СССР). – №3889635/31–26; заявл. 26.04.1985; опубл. 15.06.1988, Бюл. №22.
90. 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 (СССР). – №3962527/23–26; заявл. 08.10.1985; опубл. 23.07.1988, Бюл. № 27.
91. А.с. 1554958 СССР, МКИ В01J2/16. Устройство для сушки и гранулиро-

- вания жидких материалов / Б.С. Сажин, Б.П. Лукаческий, А.А. Полевич, А.В. Акулич, В.З. Павелко (СССР). – №4167541/31–26; заявл. 26.12.1986; опубл. 07.04.1990, Бюл. № 13.
92. 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; заявитель и патентообладатель О.Р. Иванов. – №3657451/26; заявл. 28.10.1983; опубл. 27.05.1996, Бюл. № 15.
93. А.с. 1604456 СССР, МКИ В01J2/16. Аппарат для гранулирования материала в псевдоожиженном 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 (СССР). – №4344304/31–26; заявл. 15.12.1987; опубл. 07.11.1990, Бюл. №4.
94. Пат. №10288 А Україна, МПК 7 В01J2/16. Спосіб одержання гранульованого продукту / Є.В Донат, М.П. Юхименко; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – №93111445; заявл. 31.03.1993; надрук. 25.12.1996, Бюл. № 4.
95. Апарати завислого шару. Теоретичні основи і розрахунок / Юхименко М.П., Вакал С.В., Кононенко М.П., Філонов А.П. – Суми: Собор, 2003. – 304 с.
96. Патент №29950 Україна, МПК (2006) В01J2/16. Пристрій для гранулювання рідкого матеріалу / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський, А.С Стеценко; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – №u200512066; заявл. 15.12.2005; надрук 11.02.2008, Бюл. № 3.
97. Патент №82754 Україна, МПК (2006) В01J2/16. Спосіб гранулювання рідкого матеріалу та пристрій для його здійснення / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський; заявник та патентовласник Сумський державний університет – №a200608137; заявл. 20.07.2006; надрук 12.05.2008, Бюл. № 9.
98. Артюхов А.Є. Новітнє грануляційне обладнання. Вихровий гранулятор з вібраційним розпилом розплаву / А.Є. Артюхов // Наукові праці

- ОНАХТ. – 2006. – Випуск 28, Т. 2. – С. 24–27.
99. Декл. пат. №39024 А Україна, МПК 7 B01J2/16. Спосіб гранулювання розплавів, розчинів і суспензій і пристрій для його здійснення / О.В. Парьохін, В.І. Склабінський; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – №2001010023; заявл. 03.01.2001; надрук. 15.05.2001, Бюл. № 4.
100. Декл. пат. №46560 А Україна, МПК 7 B01J2/16. Спосіб гранулювання розплавів, розчинів і суспензій і пристрій для його здійснення / О.В. Парьохін, В.І. Склабінський; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – №2001085767; заявл. 14.08.2001; надрук. 15.05.2002, Бюл. № 5.
101. Декл. пат. №69624 А Україна, МПК 7 B01J2/16. Спосіб гранулювання рідкого матеріалу і пристрій для його здійснення / В.І. Склабінський, В.М. Маренок, М.О. Кочергин; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – №2003109471; заявл. 21.10.2003; надрук. 15.09.2004, Бюл. № 9.
102. Склабинский В.И. Вопросы энергосбережения при внедрении в производство малогабаритного грануляционного оборудования / В.И. Склабинский, А.Е. Артюхов // Вісник Сумського державного університету. – 2006. – № 5 (89). – С. 76–79.
103. Артюхов А.Є. Перспективи розвитку малогабаритного грануляційного обладнання вихрового типу в сучасній хімічній промисловості / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету. – Суми: Вид-во СумДУ, 2006. – Вип.8. – С. 4.
104. Артюхов А.Е. Получение гранул безбашенным способом в аппаратах с вихревым псевдооживленным слоем / А.Е. Артюхов, В.И. Склабинский // Технологія 2005: збірник тез доповідей VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. – Северодонецьк, 2005 – С. 86–87.

105. Артюхов А.Е. Получение гранулированных продуктов в аппаратах с вихревым псевдооживленным слоем / А.Е. Артюхов, В.И. Склабинский // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету. - Суми: Вид-во СумДУ, 2005. – Вип. 7. – С 31.
106. Maplesoft Maple / A division of Waterloo Maple Inc. – 2003. – <http://www.maplesoft.com/main.shtml>; <http://www.mapleapps.com/>.
107. Borland Delphi / <http://www.borland.com/delphi/index.html>.
108. COSMOSFloWorks / SolidWorks Corporation COSMOS Analysis Products (Fluid Flow Simulation Software). – 2005. – <http://www.solidworks.com/pages/services/COSMOS/>.
109. FlowVision / ООО ТЕСИС (Современный программный комплекс от компании ТЕСИС моделирует трехмерные стационарные и нестационарные течения жидкости и газа). – М., 2005. – <http://www.flowvision.ru/>.
110. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / Повх И.Л. – Л.: Машиностроение, 1974. – 480 с.
111. Бэйнз А. Организация исследований в химической промышленности. Условия, цели и стратегия / Бэйнз А., Бредбери Ф., Саклинг С.; пер. с англ. В. Воронина – М.: Химия, 1974. – 336 с.
112. Артюхов А.Є. Комплексне дослідження вихрового псевдозрідженого шару та умов його застосування в технології виробництва мінеральних добрив / А.Є. Артюхов, В.М. Маренок, В.І. Склабінський // Вісник Сумського національного аграрного університету. – 2008. - № 3(19). – С. 182–185.
113. Батунер Л.М. Математические методы в химической технике / Л.М. Батунер, М.Е. Позин – Л.: Химия, 1971. – 824с.
114. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Шенк Х.; пер. с англ. Е.Г. Коваленко – М.: Мир, 1972. – 381 с.
115. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и нау-

- ке. Методы планирования эксперимента. Т.2. / Н. Джонсон, Ф. Лион; пер. с англ. Э.К. Лецкого, Е.В. Марковой — М.: Мир, 1972. — 516 с.
116. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М.С. Винарский, М.В. Лурье. — К.: Техніка, 1975. — 168 с.
117. Нагорнов С.А. Разработка методов расчёта процессов и создание оборудования для переработки изделий в псевдооживленных и циркуляционных средах: дисс. ... докт. техн. наук: 05.17.08 / Нагорнов С.А. — Тамбов, 2004. — 424 с.
118. Лыков М.В. Распылительные сушилки. Основы теории и расчёта / М.В. Лыков, Б.И. Леончик — М.: Машиностроение, 1966. — 332 с.
119. Сажин Б.С. Типовые сушилки со взвешенным слоем материала / Б.С. Сажин, Е.А. Чувпило — М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1975. — 71 с.
120. Маренок В.М. Оцінка ефективності застосування конічних грануляційних веж при виробництві гранульованих продуктів з розчинів / В.М. Маренок, В.І. Склабинський // Вісник Сумського державного університету. - 2005. - № 12 (84). — С. 22–27.
121. Ворошилов А.П. Аппараты с устойчивыми псевдооживленными слоями / А.П. Ворошилов, В.И. Муштаев. — Сумы: Корпункт, 2002. — 190 с.
122. Маренок В.М. Вихревой псевдооживленный слой и его практическое применение / В.М. Маренок, В.И. Склабинский // Физика аэродисперсных систем. — 2004. — № 2 — С. 86–93.
123. Пажи Д.Г. Распыливающие устройства в химической промышленности / Пажи Д.Г., Корягин А.А., Ламм Э.Л. — М.: Химия», 1975. — 200 с.
124. Пажи Д.Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов — М.: Химия, 1984. — 256 с.
125. Холин Б.Г. Центробежные и вибрационные грануляторы пластов и распылители жидкости / Холин Б.Г. — М.: Машиностроение, 1977. — 182 с.
126. Гольдштик М.А. Вихревые потоки / Гольдштик М.А. — Новосибирск: Наука, 1981. — 366 с.
127. Галич В.Н. Повышение эффективности работы центробежных пылеуло-

- вителей за счет применения встречных закрученных потоков: дисс. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Галич В.Н. – Москва, 1984 – 225 с.
128. Лебедев В.В. Сушка зернистых материалов в аппарате с модифицированным вихревым слоем: дисс. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Лебедев В.В. – Тверь, 2007. – 121 с.
129. Лопиков Александр В. Обезвоживание тонкопористых материалов в вихревых аппаратах: дисс. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Лопиков Александр В. – М., 2007. – 143 с.
130. Лопиков Алексей В. Исследование гидродинамики в аппаратах для обезвоживания широкопористых материалов в винтовых потоках: дисс. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Лопиков Алексей В. – М., 2007. – 161 с.
131. Сошенко М. В. Исследование процессов теплообмена в вихревых многофункциональных аппаратах с активной гидродинамикой: дисс. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Сошенко М. В. – М., 2005. – 141 с.
132. Кислов Е. А. Методы расчета гидродинамических и массообменных характеристик газожидкостных аппаратов с закрученными струями: дисс. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Кислов Е. А. – Ярославль, 2005. – 170 с.
133. Булычев С. Ю. Разделение гетерогенных систем в аппаратах с закрученным потоком: дисс. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Булычев С. Ю. – М., 2003. – 131 с.
134. Сокольский А. И. Термическая обработка дисперсных материалов в аппаратах с вихревыми двухфазными потоками: дисс. ...докт. техн. наук: 05.17.08 / Сокольский А. И. – Иваново, 2005. – 320 с.
135. Горюнов Ю.Н. Гидродинамика полидисперсных потоков в вихревых камерах спирально-вихревых сушилок: дисс. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Горюнов Ю.Н. – М., 1994. – 132 с.
136. Нгуен Тронг Зань. Аэродинамика и сушка дисперсных материалов в вихревой камере спирально-вихревых сушилок: дисс. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Нгуен Тронг Зань – М., 1998. – 122 с.
137. Патрашев А.Н. Прикладная гидромеханика / Патрашев А.Н., Кивако Л.А.,

- Гожий С.И. – М.: Воениздат, 1970. – 605 с.
138. Artyukhov A.E. Vortical type granulators in the chemical industry / A.E. Artyukhov // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів гуманітарного факультету. – Суми: Вид-во СумДУ, 2006. – Ч. 2. – С. 32–33.
139. Успенский В.А. Теория, расчёт и исследования вихревых аппаратов очисных сооружений: автореф. дисс. на соискание науч. степени докт. техн. наук: спец. 05.17.08 «Процессы и оборудование химической технологии» / В.А.Успенский. – М., 1978. – 34 с.
140. Дейч М.Е. Газодинамика двухфазных сред / М.Е. Дейч, Г.А. Филиппов – М.: Энергоиздат, 1981. – 472 с.
141. Ван Дайк М. Альбом течений жидкости и газа / Ван Дайк М.; пер. с англ. Соколовской Л.В. – М.: Мир, 1986. – 184с.
142. Щукин В.К. Теплообмен и гидромеханика внутренних потоков в полях массовых сил / Щукин В.К. – М.: Машиностроение, 1980. – 240 с.
143. Артюхов А.Є. Теоретичні основи дослідження руху газового потоку у вихровому грануляторі / А.Є. Артюхов // Збірник тез доповідей ХХІІ-ї наукової конференції країн СНД "Дисперсні системи" – Одеса, 2006. – С. 40–41.
144. Прандтль Л. Гидроаэромеханика / Прандтль Л.; пер. с нем. Г.А. Вольперта. – Ижевск: НИЦ РХН, 2000. – 576 с.
145. Халатов А.А. Теория и практика закрученных потоков / Халатов А.А. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.
146. Щукин В.К. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах / В.К. Щукин, А.А. Халатов. – М.: Машиностроение, 1982. – 200 с.
147. Горбис З.Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков / Горбис З.Р. – М.: Энергия, 1970. – 424 с.
148. Холин Б.Г. Гидродинамика двухфазных потоков в вихревом противоточном маассообменном аппарате / Б.Г. Холин, И.А. Ковалёв, В.И.

- Склабинский // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 1981. – Том XXV. – Выпуск 7. – Отдельный оттиск.
149. Зверев Н. И. О движении твердой частицы в потенциальном вращающемся потоке / Н. И. Зверев, С. Г. Ушаков // Инженерно-физический журнал. – 1968. – том 14. – № 1. – С. 90–93.
150. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Патанкар С.; пер. с англ. В.Д. Виленского – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152с.
151. Hinze, J. O. Turbulence / Hinze, J. O. – McGraw-Hill, New York, 1975.
152. Кочевський О. М. Математична модель внутрішніх закручених течій на базі узагальнених рівнянь Прандтля / О. М. Кочевський, В. Г. Неня, А. О. Євтушенко // Вестник НТУУ “КПІ”. – 1999. – Вып. 35. – с. 215–225.
153. Кочевский А. Н. Расчет внутренних течений жидкости в каналах с помощью программного продукта FlowVision / А. Н. Кочевский // Вісник Сумського державного університету. – 2004. – № 2 (61). – С. 25–36.
154. Парьохін О. В. Розрахунок гідродинаміки газового потоку у внутрішньому конусі вихрового гранулятора / О. В. Парьохін, В. І. Склабінський, О. М. Кочевський // Вісник Сумського національного аграрного університету. – 2002. – № 8. – С. 64–69.
155. Patancar S.V. A calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows / S.V. Patancar, D.B. Spalding // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1972. – Vol. 15. – P. 1787.
156. Rastogi A.K. Calculation of General Three-Dimensional Turbulent Boundary Layers / A.K. Rastogi, W. Rodi // AIAA J. – 1978. – Vol. 16. – P. 151.
157. Durst F. Theoretical and Experimental Investigations of Turbulent Flows / F. Durst, A.K. Rastogi // Symp. on Turbulent Shear Flows, Pennsylvania State Univ. – 1977. – Vol. 1. – P. 18.1.
158. Cebeci T. Eddy-Viscosity Distribution in Thick Axisymmetric Turbulent

- Boundary Layers / T. Cebeci // Journal of Fluids Engineering. – 1973. – Vol. 95. – P. 319.
159. Артюхов А.Е. Математическое моделирование процесса движения гранул в вихревых аппаратах с малой высотой рабочей камеры / А.Е. Артюхов, В.И. Склабинский // Вісник Сумського державного університету. – 2006. – № 12 (96). – С. 5–11.
160. Артюхов А.Є. Розробка фізичної моделі руху гранул в малогабаритних апаратах вихрового псевдозрідженого шару / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Технологія 2006: збірник тез доповідей ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. – Сєверодонецьк, 2006. – С. 42.
161. Артюхов А.Є. Деякі напрями зменшення габаритних розмірів грануляційного обладнання в сучасній хімічній промисловості / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Матеріали ІІ Міжнародної науково-практичної конференції «Дни науки - 2006». Том 33. – Хімія та хімічні технології. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2006. – С. 34–37.
162. Артюхов А.Є. Сучасний стан технології гранулювання у вітчизняному виробництві. Високоєфективне малогабаритне обладнання для проведення процесу гранулювання / А.Є. Артюхов // Сучасні проблеми технології неорганічних речовин: тези доповідей ІІІ Української науково-технічної конференції з технології неорганічних речовин. – Дніпропетровськ: УДХТУ, 2006. – С. 320–321.
163. Артюхов А.Є. Організація початкового руху гранул у вихрових апаратах та аналіз впливу гідродинамічних параметрів на стабільність киплячого шару / А.Є. Артюхов // Технологія 2007: збірник тез доповідей Х Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. – Сєверодонецьк, 2007. – С. 27.
164. Артюхов А.Є. Енергоощадні технології у хімічному виробництві. Малогабаритні вихрові гранулятори / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні пер-

- винним джерелам енергії в регіоні: матеріали четвертої міжнародної науково-практичної конференції: зб. наукових статей. – Львів, ЛьвЦНТЕІ, 2007. – С. 13–17.
165. Склабінський В.І. Розрахунок гідродинамічних параметрів закручених потоків у вихрових грануляторах аналітичним методом / В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов // Вісник Сумського державного університету. – 2008. – № 3. – С. 62–70.
166. Артюхов А.Є. Дослідження умов формування вихрового псевдозрідженого шару в малогабаритних масообмінних апаратах / А.Є. Артюхов, В.М. Маренок, В.І. Склабінський // Вісник Сумського державного університету. – 2007. – № 3. – С. 10–17.
167. Склабінський В.І. Малогабаритні апарати змінного перетину з вихровим псевдозрідженим шаром. Вплив розподільних пристроїв на рух гранул / В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов // Хімічна промисловість України. – 2006. – № 2(73). – с. 55–59.
168. Артюхов А.Є. Організація початкового руху гранул у вихрових апаратах та аналіз впливу гідродинамічних параметрів на стабільність киплячого шару / А.Є. Артюхов // Технологія 2007: збірник тез доповідей X Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. – Сєверодонецьк, 2007. – С. 27.
169. Артюхов А.Є. Дослідження роботи псевдозрідженого шару у вихровому грануляторі / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету. Частина 1. – Суми: Вид-во СумДУ, 2007. – Вип.9. – С. 66–67.
170. Artyukhov A.E. Research of false boiling layer work in vortical granulator / A.E.Artyukhov // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів гуманітарного факультету. – Суми: Вид-во СумДУ, 2007. – Ч.3. – С. 89–91.
171. Артюхов Артем. Гідродинаміка робочого простору малогабаритних вихро-

- вих грануляторів / Артем Артюхов, Всеволод Склабінський // Збірник наукових праць: Одинадцята наукова конференція «Львівські хімічні читання - 2007». – Львів: Видавничий центр львівського національного університету імені Івана Франка, 2007. – С. УЗ.
172. Артюхов А.Є. Результати експерименту та програмного моделювання стосовно гідродинаміки вихрових потоків / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – Ч. II, Вип.10. – С. 36.
173. Артюхов А.Е. Высокоэффективные вихревые аппараты в малотоннажных производствах гранулированных продуктов / А.Е. Артюхов, В.И. Склабинский // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии: тезисы докладов XX Международной научно-технической конференции «Реактив-2007». – Минск, 2007. – С. 91.
174. Артюхов А.Е. Высокоэффективные вихревые аппараты в малотоннажных производствах гранулированных продуктов / А.Е. Артюхов, В.И. Склабинский // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии: сб. научных трудов XX Международной научно-технической конференции. – Минск, 2008. – С. 272–277.
175. Артюхов А.Є. Розробка методики інженерного розрахунку вихрових грануляторів / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Вопросы химии и химической технологии. – 2007. – №5 – С. 209–211.
176. Склабінський В.І. Вплив гідродинамічного режиму обробки на міцність гранул пористої аміачної селітри (ПАС) / В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов, В.М. Маренок // Збірник наукових праць. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2007. – С. 83–85.
177. Артюхов А.Є. Промислове впровадження апаратів вихрового типу для отримання гранульованих продуктів / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Наукові праці ОНАХТ. – 2008. – Випуск 32. – С. 16–21.
178. Артюхов А.Є. Аналіз результатів дослідження гідродинаміки робочої

- камери вихрового гранулятора / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Тези доповідей III Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Хімія та сучасні технології». – Дніпропетровськ: Друкарня ДВНЗ УДХТУ, 2007. – С. 22.
179. Артюхов А.Е. Разработка высокоэффективных методов тепломассообмена с использованием вихрового псевдооживленного слоя / А.Е. Артюхов, В.И. Склабинский // матеріали III Міжнародної конференції «Стратегія якості у промисловості і освіті». – Дніпропетровськ–Варна: Фортуна–ТУ–Варна, 2007. – С. 30–33.
180. Артюхов А.Є. Оцінка впливу режиму обробки гранул на їх якість в апаратах вихрового типу / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Технологія-2008» з міжнародною участю. – Сєверодонецьк, 2008. – С. 92.
181. Артюхов А.Є. Результати експерименту та програмного моделювання стосовно гідродинаміки вихрових потоків / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету. – Суми: Вид–во СумДУ, 2008. – Ч. II, Вип.10. – С. 36.
182. Жеба К.В. Влияние добавок на свойства гранул аммиачной селитры / К.В. Жеба, А.Е. Артюхов, В.И. Склабинский // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету. – Суми: Вид–во СумДУ, 2008. – Ч. II, Вип.10. – С. 38.
183. Маренко В.М. Вплив гідро- та термодинамічних чинників на формування мікроструктури гранул / В.М. Маренко, А.Є. Артюхов // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету. – Суми: Вид–во СумДУ, 2008. – Ч. II, Вип.10. – С. 60.
184. Стеценко А.С.. Інтенсифікація процесу гранулювання у вихрових апаратах

тах псевдозрідженого шару / А.С. Стеценко, А.Є. Артюхов // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету. – Суми: Вид-во СумДУ, 2006. – Вип.8. – С. 12.

185. Артюхов А.Є. Визначення оптимальних умов формування вихрового псевдозрідженого шару в малогабаритних грануляторах / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Тези доповідей V Всеукраїнської конференції молодих вчених та студентів з актуальних питань хімії. – Дніпропетровськ: Друкарня ДНУ, 2007. – С. 137.

ДОДАТОК А

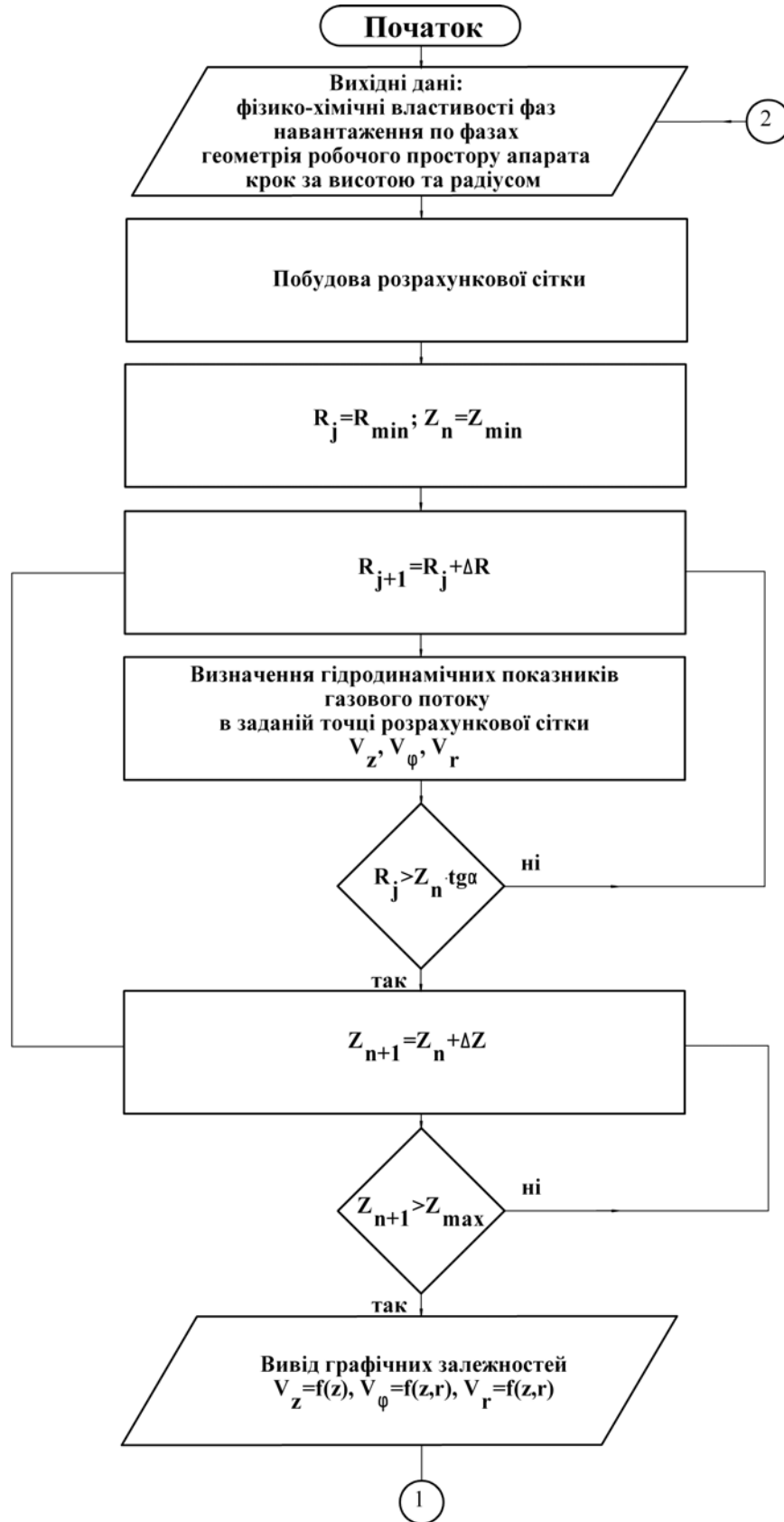


Рис. А.1. Блок-схема розрахунку гідродинамічних показників потоків у вихровому грануляторі та його інженерного розрахунку.

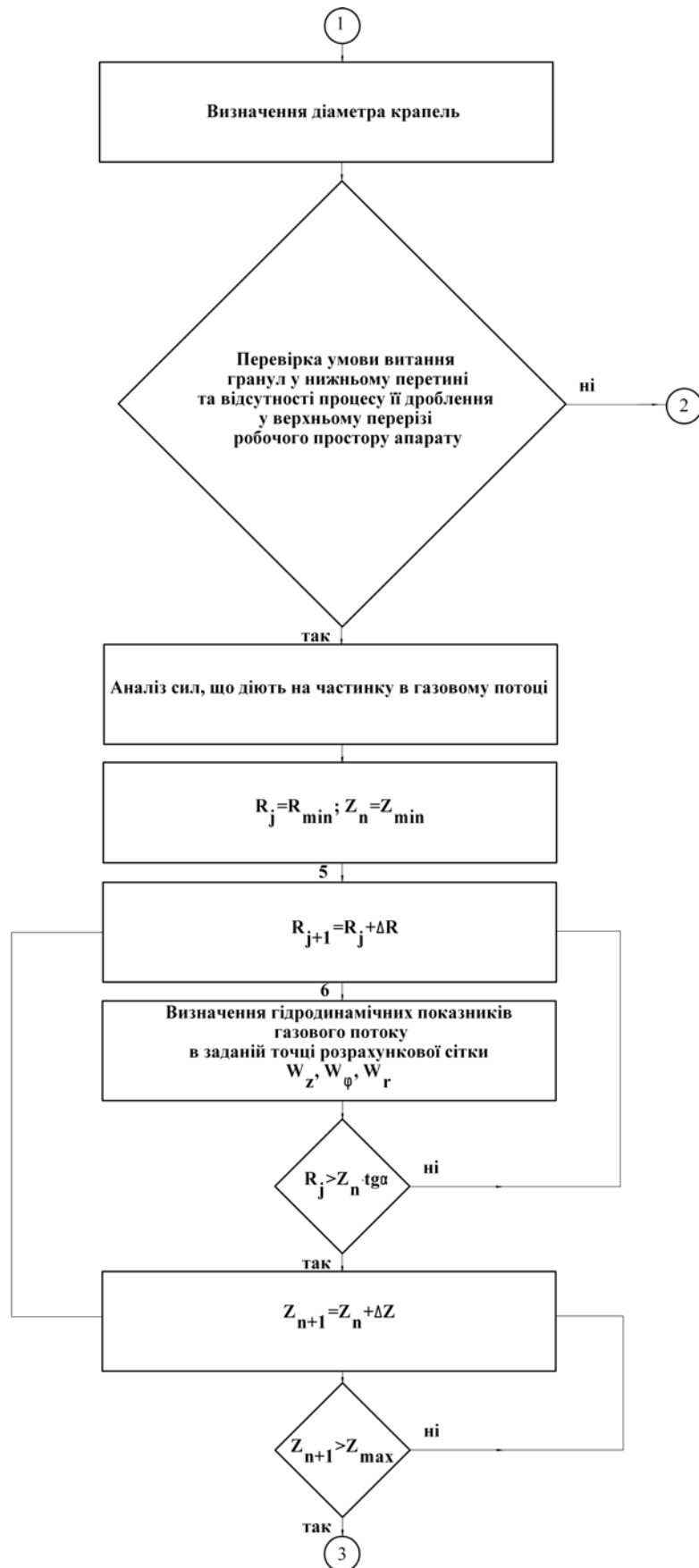


Рис. А.1. Блок-схема розрахунку гідродинамічних показників потоків у вихровому грануляторі та його інженерного розрахунку (фрагмент 2).

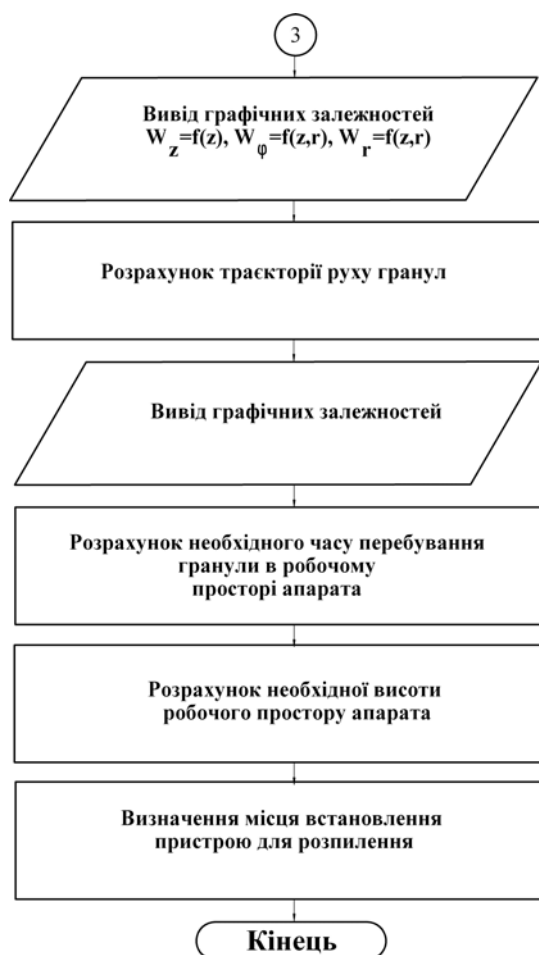


Рис. А.1. Блок-схема розрахунку гідродинамічних показників потоків у вихровому грануляторі та його інженерного розрахунку (фрагмент 3).

Програму «Розрахунок гідродинаміки потоків у вихровому грануляторі» написано на мові програмування Delphi.

Програма вводить вихідні дані з екрана, виводить результати розрахунку на екран (за необхідності – на друк) у вигляді переліку результатів або графічних залежностей.

Введення вихідних даних здійснюється через діалогове вікно. При введенні вихідних даних користувач самостійно обирає крок розбиття робочого простору вихрового гранулятора в вертикальному та горизонтальному напрямках.

Після проведення розрахунку на екрані з'являється масив числових значень визначеного параметра в кожній ячейці згідно з їх кількістю в вихідних даних.

Програма призначена для роботи в операційній системі Windows.

Ідентифікатори до програми розрахунку гідродинамічних показників потоків у вихровому грануляторі, складеної на мові програмування Delphi, наведені у табл. А.1.

Таблиця А.1

Таблиця символічних імен

Величина	Пояснення	Позначення в програмі
$V_{\phi 1}$	початкове значення колової швидкості	vfi
r	поточний радіус зрізаного конуса	r
Q	витрата газу	q
ϕ	кут розкриття конуса	fi
V_z	витратна складова швидкості газу	vz1
π	число Піфагора	pi
tg ϕ	тангенс кута розкриття конуса	tan(fi)
z_1	відстань від вершини конуса до початку зрізаного конуса	z1
V_{ϕ}	колова складова швидкості газу	vfi1
V_r	радіальна складова швидкості газу	vr1
E	коефіцієнт турбулентної в'язкості у відповідності до гіпотези Бусінеска	e
W_z	витратна складова швидкості краплі	wz1
W_{ϕ}	колова складова швидкості краплі	wfi1
W_r	радіальна складова швидкості краплі	wr1
d_c	діаметр краплі	d
g	прискорення вільного падіння	g
μ_r	коефіцієнт динамічної в'язкості газу	mu
ψ	коефіцієнт аеродинамічного опору	psi
ρ_c	густина краплі	roch
ρ_r	густина газу	rog
-	крок за висотою	dz
-	крок за радіусом	dr
z	висота зрізаного конуса	zmax
-	кількість ділень за віссю z	nz
-	кількість ділень за віссю r	nr

Текст програми розрахунку гідродинамічних показників потоків у вихровому грануляторі, складеної на мові програмування Delphi

```
unit Unit1;
```

```
interface
```

```
uses
```

```
Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,  
Dialogs, ComCtrls, TabNotBk, StdCtrls, Math, ExtCtrls, TeeProcs, TeEngine,  
Chart, series, unit2;
```

```
type skorosti = record
```

```
    vz, vr, vfi, r, z: real;
```

```
end;
```

```
type mas = array[1..10000] of real;
```

```
type
```

```
    TForm1 = class(TForm)
```

```
        TabbedNotebook1: TTabbedNotebook;
```

```
        Label1: TLabel;
```

```
        Label2: TLabel;
```

```
        Label3: TLabel;
```

```
        Label4: TLabel;
```

```
        Label5: TLabel;
```

```
        Label6: TLabel;
```

```
        Label7: TLabel;
```

```
        Label8: TLabel;
```

```
        Edit1: TEdit;
```

```
        Edit2: TEdit;
```

```
        Edit3: TEdit;
```

```
        Edit4: TEdit;
```

```
Edit5: TEdit;
Edit6: TEdit;
Edit7: TEdit;
Edit8: TEdit;
Button1: TButton;
RichEdit1: TRichEdit;
Button2: TButton;
Button3: TButton;
Chart3: TChart;
ComboBox1: TComboBox;
Label9: TLabel;
Button4: TButton;
Label10: TLabel;
ComboBox2: TComboBox;
Button5: TButton;
Series3: TLineSeries;
Chart2: TChart;
Series2: TLineSeries;
Chart1: TChart;
Series1: TLineSeries;
Button6: TButton;
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure Button3Click(Sender: TObject);
procedure Button4Click(Sender: TObject);
procedure Button5Click(Sender: TObject);
procedure Button6Click(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
```

```

    { Public declarations }
end;
const qw=0.0000027;
    qw1=0.0000022;
    g=9.8;
eps=0.001;
var
    Form1: TForm1;
    skor:array[1..1000,1..1000] of skorosti;
    //vrr,vff:real;
implementation

{$R *.dfm}

Function Fun1(r,y,vff,vrr:real):real;
begin
    Fun1:=(sqr((qw*r*vff/(qw*r+y)))/r+qw*(vrr-y))/y;
end;

Function Fun2(x,y,q,fi:real):real;
begin
    Fun2:=(-g+qw1*(q/(pi*sqr(tan(fi))*sqr(x))-y))/y;
end;

Function Runge(y:real;x:real;h:real;vff,vrr:real):real;
var
    k1,k2,k3,k4:real;
begin
    k1:=Fun1(x,y,vff,vrr);
    k2:=Fun1(x+0.5*h,y+0.5*h*k1,vff,vrr);
    k3:=Fun1(x+0.5*h,y+0.5*h*k2,vff,vrr);

```

```

k4:=Fun1(x+h,y+h*k3,vff,vrr);
Runge:=y+(h/6)*(k1+2*k2+2*k3+k4);
end;
Function Rungez(y:real;x:real;h:real;q,fi:real):real;
var
  k1,k2,k3,k4:real;
begin
  k1:=Fun2(x,y,q,fi);
  k2:=Fun2(x+0.5*h,y+0.5*h*k1,q,fi);
  k3:=Fun2(x+0.5*h,y+0.5*h*k2,q,fi);
  k4:=Fun2(x+h,y+h*k3,q,fi);
  Rungez:=y+(h/6)*(k1+2*k2+2*k3+k4);
end;

```

```

Function max(y,y1:mas; n:integer):real;
var i: integer;
    m:real;
begin
  m:=abs(y1[1]-y[1]);
  for i:=2 to n div 2 do
    if abs(y1[i]-y[2*i-1])/15>m then m:=abs(y1[i]-y[2*i-1])/15;
  max:=m;
end;

```

```

procedure vz(z,q,fi:real;var vz1:real);
begin

```

```

vz1:=q/(pi*sqr(tan(fi))*sqr(z));
end;
procedure vr(z,q,fi,r:real;var vr1:real);
begin
vr1:=(((-q*sqr(r))/(pi*sqr(tan(fi))*z*z*z))+q/(z*pi))/r;
end;
procedure vfii(z,z1,q,fi,r,vfi,e:real;var vfi1:real);
var a1,a2,a3,a4,a5,a6,a7,a8,a9:real;
begin
a1:=(-2*q*q*r*r*r/(pi*sqr(tan(fi))*z*z*(-2*q*tan(fi)*z*r*r-
3*q*tan(fi)*tan(fi)*z*z*r+2*q*tan(fi)*tan(fi)*tan(fi)*z*z*z+3*q*r*r*r+3*e*pi*tan(f
i)*tan(fi)*z*z*z*r))-(-4*vfi*pi*z*z*z*q*tan(fi)*r*r-
6*vfi*pi*z*z*z*z*q*tan(fi)*tan(fi)*r+4*vfi*pi*z*z*z*z*z*q*tan(fi)*tan(fi)*tan(fi)+
6*vfi*pi*z*z*z*q*r*r*r+6*vfi*pi*pi*z*z*z*z*z*e*tan(fi)*tan(fi)*r+q*q*r*z1*z1-
2*q*q*r*z*z)*r/(tan(fi)*pi*z*(2*z1*z1*tan(fi)*z*q*r*r+3*z1*z1*tan(fi)*tan(fi)*z*z
*q*r-2*z1*z1*tan(fi)*tan(fi)*tan(fi)*z*z*z*q-3*z1*z1*q*r*r*r-
3*z1*z1*tan(fi)*tan(fi)*pi*z*z*z*e*r-2*z*z*z*tan(fi)*q*r*r-
3*z*z*z*z*tan(fi)*tan(fi)*q*r+2*z*z*z*z*z*tan(fi)*tan(fi)*tan(fi)*q+3*z*z*z*q*r*r*r
+3*z*z*z*z*z*tan(fi)*tan(fi)*pi*e*r));
a2:=(4*vfi*pi*z*z*z*z*z*q*tan(fi)*tan(fi)*tan(fi)+6*vfi*pi*pi*z*z*z*z*z*e*tan(fi)
*tan(fi)*r-6*vfi*pi*z*z*z*z*q*tan(fi)*tan(fi)*r-
4*vfi*pi*z*z*z*z*q*tan(fi)*r*r+6*vfi*pi*z*z*z*q*r*r*r-
q*q*r*z1*z1)*r/(tan(fi)*pi*z*(2*z1*z1*tan(fi)*z*q*r*r+3*z1*z1*tan(fi)*tan(fi)*z*z
*q*r-2*z1*z1*tan(fi)*tan(fi)*tan(fi)*z*z*z*q-3*z1*z1*q*r*r*r-
3*z1*z1*tan(fi)*tan(fi)*pi*z*z*z*e*r-2*z*z*z*tan(fi)*q*r*r-
3*z*z*z*z*tan(fi)*tan(fi)*q*r+2*z*z*z*z*z*tan(fi)*tan(fi)*tan(fi)*q+3*z*z*z*q*r*r*r
+3*z*z*z*z*z*tan(fi)*tan(fi)*pi*e*r));
vfi1:=a1+a2;
end;

```

```

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var q,fi,r,e,z,z1,vfi,zmax:real;
    i,j,nr,nz:integer;
    dz,dr,dr1:real;
    s1,s2,s3,s,st,st1:string;
    wr,wr1,wz,wz1,wfi:mas;
    h1,zmin,zl1,xmin,xmax,h,x:real;
    n,k,nl1,k1:integer;
begin
    if (edit1.text='') or (edit2.text='') or (edit3.text='') or (edit4.text='') or (edit5.text='')
or (edit6.text='') then
        begin
            showmessage('Введите все значения');
            exit;
        end
    else
        begin
            s:=edit1.text;
            for i:=1 to length(s)do if s[i]='.' then s[i]=',';
            edit1.text:=s;
            s:=edit2.text;
            for i:=1 to length(s)do if s[i]='.' then s[i]=',';
            edit2.text:=s;
            s:=edit3.text;
            for i:=1 to length(s)do if s[i]='.' then s[i]=',';
            edit3.text:=s;
            s:=edit4.text;
            for i:=1 to length(s)do if s[i]='.' then s[i]=',';
            edit4.text:=s;
            s:=edit5.text;

```

```

for i:=1 to length(s)do if s[i]='.' then s[i]:=',';
edit5.text:=s;
s:=edit6.text;
for i:=1 to length(s)do if s[i]='.' then s[i]:=',';
edit6.text:=s;
q:=strtofloat(edit1.text);
fi:=strtofloat(edit2.text);
zmax:=strtofloat(edit3.text);
z1:=strtofloat(edit4.text);
vfi:=strtofloat(edit5.text);
e:=strtofloat(edit6.text);
nz:=strtoint(edit7.text);
nr:=strtoint(edit8.text);
z:=z1;
dr:=(z*tan(fi))/nr;
dr1:=dr;
r:=dr;
dz:=zmax/nz;
for i:=1 to nz do
  begin
    for j:=1 to nr-1 do
      begin
        skor[i,j].z:=z;
        skor[i,j].r:=r;
        vz(z,q,fi,skor[i,j].vz);
        vr(z,q,fi,r,skor[i,j].vr);
        vfii(z,z1,q,fi,r,vfi,e,skor[i,j].vfi);
        r:=r+dr;
      end;
    end;
  end;

```

```

wr[1]:=0.001;
xmin:=0.001;
xmax:=r;
h:=(xmax-xmin)/nr;
x:=xmin;
n:=round((xmax-xmin)/h);
for k:=2 to n do
begin
wr[k]:=Runge(wr[k-1],x,h,skor[i,k].vfi,skor[i,k].vr);
x:=x+h;
end;
repeat
for k:=1 to n do
wr1[k]:=wr[k];

h:=h/2;
n:=round((xmax-xmin)/h);
x:=xmin;
for k:=2 to n do
begin
wr[k]:=Runge(wr[k-1],x,h,skor[i,k].vfi,skor[i,k].vr);
x:=x+h;
end;
until Max(wr,wr1,n)<eps;
for k:=1 to n do
begin
wfi[k]:=(qw*skor[i,k].r*skor[i,k].vfi)/(qw*skor[i,k].r+wr[k])
end;
x:=xmin;
h:=(xmax-xmin)/nr;

```



```

n:=round((xmax-xmin)/h);
for k:=1 to n do
begin
  st:=floattostr(x)+' '+floattostr(wr[k]);
  form2.Memo1.Lines.Add(st);
  st1:=floattostr(x)+' '+floattostr(wfi[k]);
  form2.Memo3.Lines.Add(st1);
  x:=x+h;

end;

  z:=z+dz;
  dr:=(z*tan(fi))/nr;
  r:=dr;

end;
wz[1]:=0.001;
zmin:=z1;
h1:=(zmax)/nz;
z11:=z1;
n11:=round((zmax)/h1);
for k1:=2 to n11 do
begin
  wz[k1]:=Runge(wz[k1-1],z11,h1,q,fi);
  z11:=z11+h1;
end;
repeat
for k1:=1 to n11 do
  wz1[k1]:=wz[k1];

```

```

h1:=h1/2;
n11:=round((zmax)/h1);
z11:=zmin;
for k1:=2 to n11 do
begin
wz[k1]:=Runge(wz[k1-1],z11,h1,q,fi);
z11:=z11+h1;
end;
until Max(wz,wz1,n11)<eps;
z11:=zmin;
h1:=(zmax)/nz;
n11:=round((zmax)/h1);
for k1:=1 to n11 do
begin
st:=floattostr(z11)+' '+floattostr(wz[k1]);
form2.Memo2.Lines.Add(st);
z11:=z11+h1;
end;
for i:=1 to nz do
for j:=1 to nr-1 do
begin
s1:='vz('+inttostr(i)+' '+'+inttostr(j)+'')='+floattostr(skor[i,j].vz);
s2:='vr('+inttostr(i)+' '+'+inttostr(j)+'')='+floattostr(skor[i,j].vr);
s3:='vfi('+inttostr(i)+' '+'+inttostr(j)+'')='+floattostr(skor[i,j].vfi);
richedit1.Lines.Add(s1);
richedit1.Lines.Add(s2);
richedit1.Lines.Add(s3);

end;

```

```
richedit1.Lines.Add(floattostr(dz));
richedit1.Lines.Add(floattostr(dr));
end;
combobox1.Items.Clear;
combobox2.Items.Clear;
for i:=1 to nz do
begin
    combobox1.Items.Add(floattostr(skor[i,1].z));
    combobox2.Items.Add(floattostr(skor[i,1].z));
end;
end;

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
richedit1.Lines.Clear;
end;

procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
var i,nz:integer;
begin
nz:=strtoint(edit7.text);
    series1.clear;
    for i:=1 to nz do series1.AddXY(skor[i,1].z,skor[i,1].vz);
end;

procedure TForm1.Button4Click(Sender: TObject);
var i,k,nr:integer;
begin
    k:=combobox1.ItemIndex+1;
    nr:=strtoint(edit8.text);
```

```
series2.clear;
for i:=1 to nr-1 do
series2.AddXY(skor[k,i].r,skor[k,i].vr);
end;

procedure TForm1.Button5Click(Sender: TObject);
var i,k,nr:integer;
begin
k:=combobox2.ItemIndex+1;
nr:=strtoint(edit8.text);
series3.clear;
for i:=1 to nr-1 do
series3.AddXY(skor[k,i].r,skor[k,i].vfi);
end;

procedure TForm1.Button6Click(Sender: TObject);
begin
form2.Visible:=true;
end;

end.
```

ДОДАТОК Б



ЗАКРИТЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
«ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ПРОМИСЛОВА ТЕХНОЛОГІЯ
ВИБУХОВИХ РОБІТ» (ЗАТ «ТЕХНОВИБУХ»)

м.Київ, вул. Салютна, 11, в.75. Р/р 26006301240301 в Головному міському відділенні ПДР м.Києва, МФО 322250, код ЄДРПО 25274773.

☎ Тел./факс 494-21-79, поштова адреса: 04128, м. Київ, вул.Тутковська, 19а,
свідоцтво платника ПДВ 38470710, ідентифікаційний № 252747726122

АКТ

про впровадження науково-технічних результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук
Артюхова Артема Євгеновича

Даним актом засвідчується, що наукові результати, технологічні рекомендації та конструктивні параметри грануляційного обладнання, отримані в дисертаційній роботі А.С.Артюхова «Гідродинамічні чинники грануляційних пристроїв із зниженою висотою польоту гранул», впроваджені при отриманні дослідної партії пористої зміачної селітри (ПАС) з метою створення на території України власного виробництва ПАС. Результати отримано під час виконання пошукових робіт кафедрою «Процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв» Сумського державного університету згідно тематично плану науково-дослідних робіт за темою «Дослідження вихрових грануляційних та масо теплообмінних пристроїв».

Результати математичного моделювання та серії експериментальних досліджень дослідного варіанту вихрового гранулятора псевдозрідженого шару в складі технологічної схеми безбаштового гранулювання, проведені здобувачем, представляють науково-практичну цінність у перспективі переходу від великогабаритного, трудо- та матеріаломісного обладнання баштового типу до високоєфективної малогабаритної апаратури вихрового псевдозрідженого шару великої питомої потужності.

Здобувач проймав безпосередню участь на всіх стадіях дослідних та конструкторських робіт, при його особистому контролі в якості відповідального виконання виготовлено дослідну партію продукту згідно замовлення, проведено нормативний контроль його якості на відповідність чинним нормативним документам, що діють на території держави, та передано дослідну партію замовнику (протокол засідання технічної ради від 04.02.2005 р.). Розроблена здобувачем конструкція вихрового гранулятора псевдозрідженого шару і видані ним рекомендації щодо підвищення ефективності проведення процесу гранулоутворення є оригінальними з науково-практичної точки зору при забезпеченні відповідної якості кінцевого продукту. Наукове обґрунтування новизни результатів дисертаційної роботи здобувача дозволяє здійснити процес гранулювання з більшою ефективністю в порівнянні з обладнанням баштового типу і забезпечити необхідні фізико-хімічні та експлуатаційні характеристики ПАС.

Голова правління,
докт. техн. наук

Генеральний директор



(Handwritten signature)
12.03.2003 р.

В.С. Прокопенко

І.В. Косьмін