

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

На правах рукопису

АРТЮХОВА НАДІЯ ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 66.047.3-982

**СУШІННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ У БАГАТОСТУПЕНЕВИХ
ПОЛИЧНИХ АПАРАТАХ З АКТИВНИМ ГІДРОДИНАМІЧНИМ РЕЖИМОМ**

Спеціальність 05.17.08 — процеси та обладнання хімічної технології

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
кандидат технічних наук, доцент
Юхименко Микола Петрович

Суми – 2015

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЇ СУШІННЯ У ЗВАЖЕНОМУ ШАРІ	14
1.1 Гідродинамічні умови процесу сушіння в апаратах зваженого шару.	14
1.2 Кінетика тепломасообміну при сушінні вологих матеріалів	18
1.3 Конструктивне оформлення сушарок зваженого шару для дисперсних матеріалів	22
1.4 Вирішення проблеми енергозбереження в процесах сушіння.	28
1.5 Висновки до першого розділу, постановка задач досліджень.	32
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	37
2.1 Загальна методика проведення досліджень	37
2.2 Методи і засоби математичного моделювання	38
2.3 Будова експериментальної установки	38
2.4 Методика проведення експериментальних досліджень	43
2.4.1 Контроль та вимірювання технологічних параметрів процесу	43
2.4.2 Контроль та вимірювання гідродинамічних характеристик	45
2.4.3 Контроль та вимірювання температурно-вологісних характеристик	48
2.5 Методика обробки результатів експериментальних досліджень. Оцінювання впливу похибок вимірів на результати досліджень	49
2.6 Висновки до другого розділу	51
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНИЙ ОПИС ГІДРОДИНАМІКИ ПОТОКІВ ТА ІНТЕНСИВНОСТІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ У БАГАТОСТУПЕНЕВИХ ПОЛИЧНИХ АПАРАТАХ	52
3.1 Фізична модель гідродинаміки руху потоків та процесу сушіння дисперсних матеріалів у поличній сушарці.	52

3.2 Математична модель процесу сушіння дисперсних матеріалів у гравітаційних поличних апаратах	56
3.2.1 Нагрівання та зневоднення дисперсного матеріалу в процесі сушіння.	57
3.2.2 Гідродинаміка газового потоку та шару дисперсного матеріалу в гравітаційній поличній сушарці	64
3.2.3 Опис процесу сушіння в об'ємі гравітаційної поличної сушарки	77
3.3 Висновки до третього розділу	87
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ В ГРАВІТАЦІЙНИХ ПОЛИЧНИХ АПАРАТАХ	88
4.1 Мета та задачі експериментальних досліджень	88
4.2 Дослідження гідродинаміки руху потоків у гравітаційній поличній сушарці	88
4.2.1 Гідродинаміка руху газового потоку	89
4.2.2 Гідродинаміка руху дисперсного матеріалу	95
4.3 Визначення ефективності видалення вологи з дисперсних матеріалів в багатоступеневій гравітаційній поличній сушарці	103
4.3.1 Визначення коефіцієнта масовіддачі	103
4.3.2 Визначення ефективності процесу сушіння	105
4.4 Висновки до четвертого розділу	113
РОЗДІЛ 5. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	115
5.1 Аналіз і порівняння результатів теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень	115
5.1.1 Гідродинаміка руху потоків	115
5.1.2 Ефективність роботи ступенів поличної сушарки	119
5.2 Розроблення нових конструкцій поличних сушарок	121
5.3 Інженерна методика розрахунку багатоступеневої гравітаційної поличної сушарки. Оптимізація енерговитрат на процес сушіння в багатоступеневих апаратах	126
5.4 Дослідно-промислове випробування гравітаційної поличної сушарки	133

5.4.1	Опис дослідно-промислової установки	133
5.4.2	Результати дослідно-промислових випробувань	133
5.5	Висновки до п'ятого розділу	138
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	139
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	141
	ДОДАТКИ	159

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

A	–	кінетичний температурний параметр процесу;
a_m	–	коефіцієнт теплопроводності, $\text{м}^2/\text{с}$;
B	–	кінетичний параметр перенесення вологи;
b	–	вологість сушильного агента, $\text{кг}/\text{кг}$;
c	–	теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;
D	–	коефіцієнт дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$;
d	–	діаметр, м ;
E	–	ефективність сушіння;
f	–	площа, м^2 ;
G	–	масова витрата, $\text{кг}/\text{с}$;
g	–	прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$;
L	–	довжина, м ;
Δp	–	втрати тиску, Па ;
q, q'	–	питомий тепловміст сушильного агента та матеріалу, $\text{Дж}/\text{м}^3$;
Q, Q'	–	тепловий потік сушильного агента та матеріалу $\text{Дж}/\text{с}$;
S	–	поверхня вологоперенесення, м^2 ;
s	–	питома поверхня вологоперенесення, $1/\text{м}$;
t	–	температура, К ($^{\circ}\text{C}$);
U	–	відносна вологість, $\text{кг}/\text{кг}$;
V	–	об'ємна витрата, $\text{м}^3/\text{с}$, об'єм, м^3 ;
W	–	швидкість, $\text{м}/\text{с}$;
x	–	вологість матеріалу, $\text{кг}/\text{кг}$;
z	–	питомі втрати тиску по довжині, $\text{Па}/\text{м}$;
α	–	коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$;
β	–	коефіцієнт масовіддачі, $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$;
γ	–	кут нахилу полиці до горизонту, градус;
ε	–	порізність зваженого шару, долі;
ζ	–	коефіцієнт гідродинамічного опору частинки дії газового потоку;
θ', θ	–	параметр апроксимуючої кривої для матеріалу та повітря;

- λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);
 \bar{V} – об'єм, м³;
 v – відносний об'єм, доли; кінематичний коефіцієнт в'язкості газового потоку, м²/с;
 ρ – густина, кг/м³;
 τ – час, с;
 φ – коефіцієнт швидкості;
 ψ – площа вільного перерізу полиці, %.

Скорочення

- a – апарат
 v – вода
відн – відносний
вол – волога зона
 g – газ
зер – зерновий матеріал
 m – матеріал
 n – нагрівання
отв – отвір
 n – полиця
пер – перебування
пов – поверхня
поч – початковий
рз – розвантажувальний зазор
 s – сушіння
ст – ступінь
сум – суміш
суш – сушильний агент
 $ч$ – частинка

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток сучасного промислового виробництва ставить нові підвищені вимоги до техніки сушіння і технологічних, екологічних та економічних характеристик апаратурного обладнання сучасних виробництв, спеціалізованих у хімічній, харчовій та сільськогосподарській галузях.

Більшість матеріалів, що піддаються сушінню, являють собою дисперсні фази органічного та неорганічного походження. Для реалізації цього процесу розроблені та впроваджені у виробництво апарати різноманітних конструкцій залежно від способу сушіння сировини [1].

На сучасному етапі розвитку промисловості актуальним питанням, що потребує вирішення, є пошук енергоефективних способів сушіння. Одним з ефективних методів здійснення процесів тепломасообміну є використання зваженого шару в апаратах з активним гідродинамічним режимом, що значно інтенсифікує технологічний процес та забезпечує високу якість готового продукту з необхідною кінцевою вологістю [2,3]. Використання зваженого шару характеризується рядом переваг, які відмічені у працях зарубіжних і вітчизняних науковців [4–9]. Разом із перевагами запропонованого способу проведення тепломасообмінних процесів слід зазначити, що здійснення сушіння в такому режимі потребує значної кількості енергії й витрат газового потоку. Перспективним напрямом зменшення матеріальних та енергетичних витрат під час проведення тепломасообмінних процесів у зваженому шарі є використання багатоступеневого протитечійного контакту зріджувального агента та дисперсної фази. Такі процеси (знепилювання, пневмокласифікація, гранулювання, теплообмін та ін.) реалізуються в апаратах поличного типу [10]. Використання наведеної організації руху потоків у застосуванні до процесів сушіння на цей час широко не висвітлено в сучасній науковій літературі, тому потрібні більш глибокий аналіз гідродинамічних умов та кінетики проведення цього процесу, розроблення надійних методів розрахунку поличних сушарок.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася згідно з пріоритетними напрямами наукової роботи Сумського

державного університету «Розробка та дослідження високоефективних апаратів для процесів масообміну, кристалізації та класифікації» (номер державної реєстрації 0110U001953) і «Дослідження гідродинаміки та процесів тепломасообміну в апаратах з дисперсними фазами» (номер державної реєстрації 0115U002551).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є дослідження закономірностей процесу сушіння дисперсних матеріалів у багатоступеневих поличних апаратах та впливу режимних і конструктивних параметрів на ефективність процесу.

Для реалізації поставленої мети необхідним є вирішення таких завдань:

- аналіз гідродинамічних характеристик апаратів зваженого шару, у т. ч. поличних;
- розроблення фізичної моделі процесу сушіння в поличних апаратах зваженого шару;
- вивчення закономірностей процесу сушіння дисперсних матеріалів в апаратах зваженого шару різних конструкцій;
- створення математичної моделі процесу сушіння дисперсних матеріалів у багатоступеневих апаратах зваженого шару;
- експериментальне дослідження гідродинаміки руху потоків у багатоступеневих апаратах зваженого шару, інтенсивності процесу сушіння на кожному ступені каскаду полиць гравітаційної поличної сушарки, ефективності кожного ступеня каскаду;
- моделювання гідродинамічних умов руху потоку сушильного агента в об'ємі поличного апарата чисельними методами;
- розроблення методики оцінювання енергетичної ефективності процесу зневоднення дисперсних матеріалів у поличній сушарці;
- створення методики інженерного розрахунку поличних сушарок;
- удосконалення конструкцій сушарок з активним протитечійним режимом взаємодії сушильного агента з продуктом, що вирішує питання енергозбереження та оптимізації процесу сушіння;

– дослідно-промислове впровадження розроблених конструкцій поличних сушарок.

Об'єктом дослідження є процес сушіння дисперсних матеріалів у багатоступневих апаратах зваженого шару.

Предмет дослідження – гідродинаміка потоків, закономірності зміни температурно-вологісних характеристик дисперсного матеріалу і сушильного агента в процесі сушіння в поличних апаратах зваженого шару з активним гідродинамічним режимом.

Методи дослідження стосуються механізмів сушіння, визначення гідродинамічних характеристик одно- та двофазних потоків, методики вимірювання теплових потоків у масообмінних модулях, а також аналітичних досліджень із використанням обчислювальної техніки. Експериментальні дослідження проводилися з використанням контрольно-вимірювальної апаратури. 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 фундаментальних положеннях механіки рідини та газу, кінетики тепломасообміну, а також зіставленням розрахункових даних з відомими та особисто отриманими результатами експерименту. Достовірність отриманих результатів експериментальних досліджень визначається оцінюванням похибок та довірчих інтервалів при верифікації результатів.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі аналізу теоретичних та експериментальних даних одержано такі наукові результати:

- вперше теоретично описано гідродинамічні умови та кінетичні закономірності проведення процесу сушіння у багатоступневих поличних апаратах зваженого шару;
- за результатами експериментальних досліджень вперше одержано тепломасообмінні параметри процесу сушіння дисперсних матеріалів в апаратах із вертикальним секціонуванням робочого простору з активним гідродинамічним режимом;

- одержано критеріальну залежність, що дозволяє прогнозувати значення коефіцієнта масовіддачі під час сушіння в гравітаційних поличних сушарках;
- одержано рівняння для визначення ефективності процесу сушіння на кожному зі ступенів сушарки залежно від конструкції поличних контактів та організації руху сушильного агента;
- створено рекурентну модель розрахунку температурно-вологісних параметрів процесу сушіння у багатоступневих поличних апаратах;
- створено математичний апарат для визначення оптимальних енергетичних витрат на процес сушіння в багатоступневих апаратах зваженого шару.

Практичне значення одержаних результатів. На базі аналізу створеної фізичної та математичної моделей і проведених експериментальних досліджень розроблено методику інженерного розрахунку багатоступневих сушарок поличного типу з визначенням основних геометричних характеристик апарата і температурно-вологісних параметрів потоків дисперсного матеріалу та сушильного агента. Удосконалені існуючі поличні апарати для застосування в процесах сушіння, нові конструкції яких захищені патентами України. Одержані наукові результати і практичні рекомендації використані та впроваджені у виробництво під час розроблення технології процесу сушіння та конструкції поличної сушарки для сушіння зерен соняшнику і пшениці (фермерське господарство «Яковлева», м. Мелітополь).

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає у: проведенні математичного моделювання з метою визначення гідродинамічних характеристик процесу сушіння у багатоступневому поличному апараті зваженого шару і температурно-вологісних параметрів потоків; аналізі класичних рівнянь і положень гідрогазодинаміки та кінетики з подальшою адаптацією їх для одержання розрахункових залежностей; підборі та вдосконаленні методик проведення експерименту з визначенням гідродинамічних параметрів потоків дисперсного матеріалу та сушильного агента, закономірностей процесу сушіння; розробленні та конструюванні натурального стенда для проведення експерименту; аналізі результатів та розроблення інженерної методики розрахунку сушильних багатоступневих апаратів поличного типу. Поставлення завдання та формулювання висновків проводилися під керівниц-

твом наукового керівника кандидата технічних наук, доцента Юхименка М. П. Здобувач брав участь на всіх стадіях науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт із виготовлення й авторського нагляду, а також упродовж експлуатації експериментального та дослідно-промислового зразків гравітаційних поличних сушарок.

Усі результати, що складають основний зміст дисертаційної роботи, обговорювалися на міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях, де здобувач особисто доповідав результати роботи [63,66,68,70,74,113,114,144–146,154,159,160,164,167]. На базі зазначених робіт захищено патентами України [156–158] нові пристрої для сушіння дисперсних матеріалів у зваженому шарі. Створено комп'ютерну програму для розрахунку процесу багатоступеневого сушіння, яка захищена авторським свідоцтвом на твір [169].

У статтях, які написані особисто та у співавторстві та опубліковані у фахових виданнях переліку МОН України, у наукових періодичних видань інших держав та виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз [64,65,82,93,139,143,148,150,152,155,163,166,168], особистий внесок здобувача полягає в наступному:

- у роботі [64] проаналізовано стан проблеми сушіння дисперсних матеріалів у конвективних сушарках, обґрунтовано застосування комбінованих конструкцій апаратів з активним гідродинамічним режимом для інтенсифікації тепломасообмінних процесів;

- у роботі [65] обґрунтована можливість зменшення енергетичних витрат під час застосування багатоступневих поличних сушарок;

- у роботі [82] наведено основні переваги багатоступневих поличних апаратів у застосуванні до процесів сушіння, сформульовано мету і завдання дисертаційних досліджень;

- у роботі [93] представлено методику проведення експерименту, досліджено гідродинамічні умови руху одно- та двофазного потоків в об'ємі поличної сушарки та визначено основні режими її роботи;

- у роботі [139] представлено теоретичні основи розрахунку температурно-вологісних характеристик потоків дисперсного матеріалу та сушильного агента на

каскаді полиць сушарки;

– у роботі [143] розроблено математичний апарат для розрахунку поступеного процесу сушіння дисперсного матеріалу в поличній сушарці;

– у роботі [148] експериментально визначено оптимальну конструкцію поличних контактів і раціональну організацію руху сушильного агента;

– у роботі [150] подано теоретичні та експериментальні дані з розрахунку часу перебування дисперсного матеріалу на полиці сушарки;

– у роботі [152] представлені результати експериментальних досліджень з оцінювання ефективності сушіння на ступенях каскаду полиць сушарки залежно від конструкції полиці та організації руху сушильного агента;

– у роботі [155] представлено порівняльні результати дослідження гідродинаміки нових конструкцій поличних сушарок;

– у роботі [163] проведено обґрунтування методики оцінювання та оптимізації енергетичних характеристик процесу в поличних сушарках залежно від аеродинамічного режиму роботи апарата;

– у роботі [166] представлено дослідно-промислову схему сушіння зернистих харчових матеріалів та розроблено сушарку в складі цієї схеми;

– у роботі [168] представлено результати промислового експерименту з сушіння соняшника в поличній сушарці.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: Міжнародній науково-практичній конференції «Научное творчество и интеллектуальный потенциал: опыт и перспективы развития» (м. Усть-Каменогорськ, Казахстан, 2011 р.), XIII, XIV наукових конференціях «Львівські хімічні читання» (м. Львів, 2011, 2013 рр.), III, IV Міжнародних науково-практичних конференціях «Інноваційні енерготехнології» (м. Одеса, 2011, 2013 рр.), IV Міжнародній конференції «Стратегія якості у промисловості і освіті» (м. Варна, Болгарія, 2011 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (м. Харків, 2011 р.), II Міжнародній Казахстансько-Російській конференції з хімії та хімічної технології (м. Караганда, Казахстан, 2012 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Тех-

нологія» (м. Сєвєродонецьк, 2012 р.), VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення» (м. Алушта, 2012 р.), I Міжнародній науково-технічній конференції «Хімічна технологія: наука та виробництво» (м. Шостка, 2012 р.), II Міжнародній науково-практичній конференції «Иновационные технологии в производстве, науке и образовании» (м. Махачкала, Росія, 2012 р.), XIV, XV Міжнародних наукових конференціях «Удосконалення процесів та обладнання харчових і хімічних виробництв» (м. Одеса, 2012, 2014 рр.), Міжнародній науково-практичній конференції «Молодёжь и инновации» (м. Горки, Білорусь, 2013 р.), International scientific conference «Actual problems of ICT specialists' training», (м. Хмельницький, 2013 р.), Всеукраїнських міжвузівських науково-технічних конференціях «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 2011–2014 рр.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано у 33 друкованих працях, із них 13 статей – у наукових фахових виданнях України та іноземних держав (у тому числі 1 стаття – у виданні, що обліковується наукометричною базою Scopus). Отримано 3 патенти України на корисну модель та авторське свідоцтво на твір (комп'ютерна програма «Multistage heat treatment»).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 169 найменувань на 18 сторінках, 4 додатків на 7 сторінках. Дисертацію викладено на 165 сторінках, із них 129 сторінок основного тексту; робота містить 66 рисунків і 4 таблиці, зокрема 6 рисунків і 1 таблиця на 5 окремих аркушах.

РОЗДІЛ 1

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЇ СУШІННЯ У ЗВАЖЕНОМУ ШАРІ

1.1 Гідродинамічні умови процесу сушіння в апаратах зваженого шару

Показники тепломасообмінних процесів у зваженому шарі істотним чином визначаються його гідродинамічними особливостями [11]. Ефективність роботи апаратів для сушіння матеріалів у зваженому шарі в значній мірі залежить від поля течії газового потоку, розподіл якого за робочим простором апарата впливає на профіль температур і концентрацій дисперсної (твердої) фази в газовому потоці [12]. Розгляд характеру руху газового потоку є важливим для встановлення закономірностей взаємодії його з твердою фазою. Визначення гідродинамічних умов руху газового потоку дає можливість математичного опису швидкості та часу перебування твердих частинок в апараті [13].

Рух газу у загальному вигляді можна описати за допомогою системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса [14] і рівняння нерозривності потоку [15]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W_{z(x)}}{\partial \tau} + W_{z(x,y,z)} \operatorname{div} W_z &= -\frac{1}{\rho_z} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \nabla^2 W_{z(x)} \\ \frac{\partial W_{z(y)}}{\partial \tau} + W_{z(x,y,z)} \operatorname{div} W_z &= -\frac{1}{\rho_z} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \nabla^2 W_{z(y)} \\ \frac{\partial W_{z(z)}}{\partial \tau} + W_{z(x,y,z)} \operatorname{div} W_z &= g - \frac{1}{\rho_z} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \nabla^2 W_{z(z)} \end{aligned} \right\}, \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial(\rho_z W_{z(x)})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_z W_{z(y)})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_z W_{z(z)})}{\partial z} = 0, \quad (1.2)$$

де x, y, z – напрямки (декартові координати); W_z – швидкість газового потоку; τ – час; ρ_z – густина газового потоку; g – прискорення вільного падіння; P – тиск; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості газового потоку.

Здійснення процесу сушіння та показники його ефективності в зваженому шарі в значній мірі залежить від конструкції апарата. Важливим є вибір конструкції сушильного апарата, який в найкращій мірі відповідає фізико-хімічним властивостям матеріалу та необхідній продуктивності [16]. Визначення полів швидкостей газового потоку в робочому просторі апарата зваженого шару в комплексі з розрахунками швидкості переходу щільного шару матеріалу в зважений стан, умов розширення шару матеріалу, робочих параметрів псевдозрідження та умов винесення матеріалу з апарата [17,18] дозволяє провести оптимальний підбір конструктивних характеристик апарата такого типу [19].

Важливим питанням при дослідженні гідродинаміки руху потоків під час сушіння у зваженому шарі є встановлення закономірностей руху дисперсної фази під дією суцільної. Аналіз літературних даних [20] дозволив виділити моделі руху і перемішування газу у різних фазах (з різною густиною) зваженого шару матеріалу (рисунок 1.1).

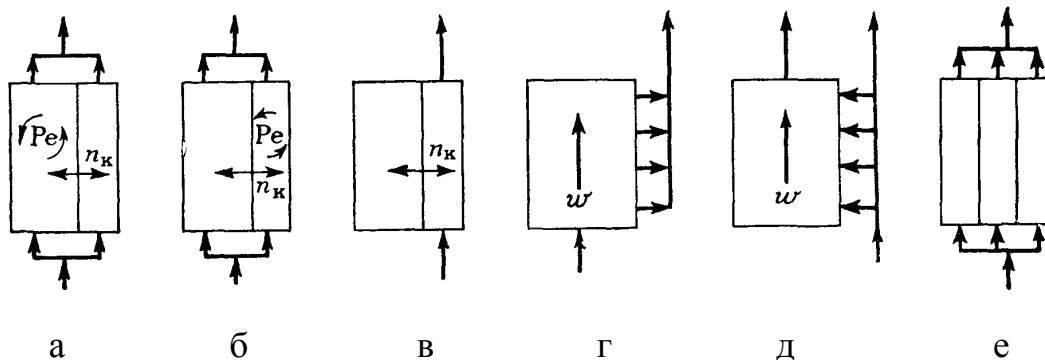


Рисунок 1.1 – Схеми моделей, які використовуються в зваженому шарі:

а – двофазна модель, яка враховує міжфазний обмін, перемішування в щільній фазі;
 б – теж саме, під час перемішування в розрідженій фазі; в – «проста» двофазна модель, перемішування відсутнє; г – модель «повної сегрегації», газ надходить в щільну фазу і поступово переходить у розріджену; д – модель «максимальної змішаності», газ надходить у розріджену фазу і поступово переходить у щільну; е – шар представлено як сукупність апаратів витіснення з різним часом перебування потоку

в кожному

Слід зазначити, що для випадку встановлення в корпус апарата деяких контактних пристроїв (газорозподільної решітки або перфорованих полиць), які спри-

чиняють велику нерівномірність розподілу газового потоку, необхідно враховувати поле швидкостей в залежності від його перерізу.

Авторами [21] була отримана залежність, яка враховує швидкість газового потоку залежно від кроку отворів газорозподільної решітки:

$$W_{z(z)} = \frac{W_z h_p m^2}{5Z} + const, \quad (1.3)$$

де W_z – осереднена по координаті і часу швидкість потоку; h_p – крок решітки; Z – довжина за вертикальною координатою (за напрямком руху газового потоку); $m = 1,95-2,20$ – постійний чисельний коефіцієнт [21].

В результаті перетворення рівняння Кармана-Ховарта і вираза Тейлора був запропонований закон розподілу швидкості газового потоку в надполичному просторі [22]:

$$\left. \begin{aligned} W_{z(pn)} &= \frac{W_z \left(\frac{d_0}{\sigma_n} \right) m^2}{5,62 \sqrt{f_{pn} + f_n (h+1)}} \\ W_{z(x)} &= W_{z(pn)} \left(1 - \frac{X}{L_a} \right)^n \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

де d_0 – діаметр отворів поличного перфорованого контакту; σ_n – товщина поличного контакту; f_{pn} , f_n – живий переріз розвантажувального простору і полиці;

$h = \frac{Z}{L_a}$ – безрозмірна поточна координата по висоті робочого об'єму над розвантажувальним простором; X – довжина за горизонтальною координатою. Постійна m

визначається при відношенні довжини розвантажувального зазору до довжини апарата

$\frac{L_{p3}}{L_a} = 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,15$ відповідно $m = 1,27; 1,31; 1,37; 1,41; 1,55$ [22]; n – чи-

сло, яке залежить від значення критерія Рейнольдса Re [21].

Всі гідродинамічні розрахунки дисперсних двофазних потоків базуються на основі другого закону Ньютона [23]:

$$m \frac{d\vec{W}_q}{d\tau} = \Sigma \vec{F}, \quad (1.5)$$

де m – маса частинки; \vec{W}_q – вектор швидкості частинки; $\Sigma \vec{F}$ – вектор рівнодіючої сил, які діють на частинку.

Згідно цього закону на частинку чинять вплив такі види сил [24]:

– сили, які діють на поверхню частинки з боку газового потоку: сила аеродинамічного опору, сила Архімеда, підйомна сила Жуковського, сила, яка обумовлена інерцією приєднаної маси, сила Бассе, дифузійна сила;

– масові і зовнішні сили – сила тяжіння, сила електростатичного і магнітного поля, уявні сили, які обумовлені обертанням рухомої системи координат, тобто відцентрова і коріолісова сили, реактивна сила, яка виникає під час відділення тіла деякої маси;

– сили, які діють між поверхнями окремих твердих частинок і стінками апарата – сили від взаємного контакту, сила тертя, сили адгезії і т.д.

Результати, наведені в роботі Сокольського [24] показали, що дія усіх інших сил на частинку, окрім аеродинамічного опору з боку висхідного газового потоку, сили тяжіння, зіткнення частинок зі стінками апарата і контактними елементами, а також їх удару одна з одною внаслідок обертання і взаємодії з газовим потоком не має значного впливу. Ці дослідження знайшли підтвердження у авторів [13], які також одержали рівняння руху частинок в горизонтальному і вертикальному напрямках:

$$\begin{cases} \frac{dW_{q(x)}}{d\tau} = \frac{3}{4} \zeta \rho_z \frac{(W_z - W_q)^2}{\rho_q d_q} \\ \frac{dW_{q(y)}}{d\tau} = \pm g \pm \frac{3}{4} \zeta \rho_z \frac{(W_z - W_q)^2}{\rho_q d_q} \end{cases}, \quad (1.6)$$

де ζ – коефіцієнт гідродинамічного опору частинки дії газового потоку, величина

якого залежить від числа Рейнольдса; ρ_c – густина частинки; d_c – діаметр частинки.

Розв'язання систем диференціальних рівнянь руху газового потоку та твердої фази дозволяє визначити швидкість, траєкторію переміщення частинок, а також час перебування частинок у вільному робочому просторі апарата. Суттєвий вплив на визначення необхідного часу перебування частинок в апараті, який має контактні пристрої, чинить не тільки гідродинаміка потоків, а і кінетика процесу сушіння в апаратах зваженого шару (частинка впродовж сушіння змінює свою масу, що відображається на режимі її руху).

Необхідно зазначити, що аналітичні залежності, представлені у даному розділі, ще не дозволяють достовірно описати гідродинаміку руху твердих частинок в апараті з контактними пристроями. Це пов'язано тим, що запропоновані аналітичні закономірності не враховують вплив основних конструктивних параметрів поличних контактів на час перебування частинок у робочому просторі апарата.

1.2 Кінетика тепломасообміну при сушінні вологих матеріалів

Кінетика процесу сушіння вологих твердих матеріалів характеризується як протіканням тепло- і масообміну між поверхнею тіла і навколишнім середовищем, так і перенесенням тепла та вологи всередині тіла.

Теплотехнічні та технологічні закономірності сушіння взаємно пов'язані між собою та суттєво впливають на кінетику зневоднення вологих матеріалів [25]. В сушильній техніці існує 3 групи вологих матеріалів, різноманітних за своїми властивостями: капілярно-пористі, колоїдні та колоїдні капілярно-пористі тіла. Капілярно-пористі матеріали практично не деформуються в процесі видалення з них вологи. Колоїдні тіла під час сушіння значно зменшують свій розмір і залишаються еластичними. Колоїдні капілярно-пористі тіла мають проміжні властивості між попередніми.

Одним із основних факторів, який впливає на механізм перенесення тепла і речовини всередині тіла, є форма зв'язку поглиненої вологи з матеріалом: хімічна, фізико-хімічна і фізико-механічна. Характер та енергія форми зв'язку матеріалу з

молекулами вологи визначає загальну кількість вологи, яку здатний утримувати матеріал під час рівноваги його з навколишнім середовищем [26].

Аналіз процесу сушіння дозволяє виділити декілька основних задач масообміну: зовнішню, під час якої опір поверхневого шару перенесення вологи занадто більший дифузійного опору всередині частинки; внутрішню – навпаки, дифузійний опір перенесення вологи всередині частинки значно перевищує дифузійний опір поверхневого шару і змішану – коли обидва опори приблизно однакові. Кожна з задач характеризується визначеним діапазоном числових значень критерію Біо. В загальному випадку крива сушіння складається із декількох ділянок, які відповідають різним періодам процесу: 1) нагрівання матеріалу; 2) сушіння з постійною швидкістю (зовнішня задача); 3) сушіння зі спадаючою швидкістю (внутрішня задача). При переході процесу від першого періоду до другого виділяється також змішана задача [27]. На рисунку 1.2 представлено графічне зображення кінетики сушіння. Криву швидкості сушіння (рисунок 1.2, б) одержано графічним диференціюванням кривої сушіння (рисунок 1.2, а, крива 1).

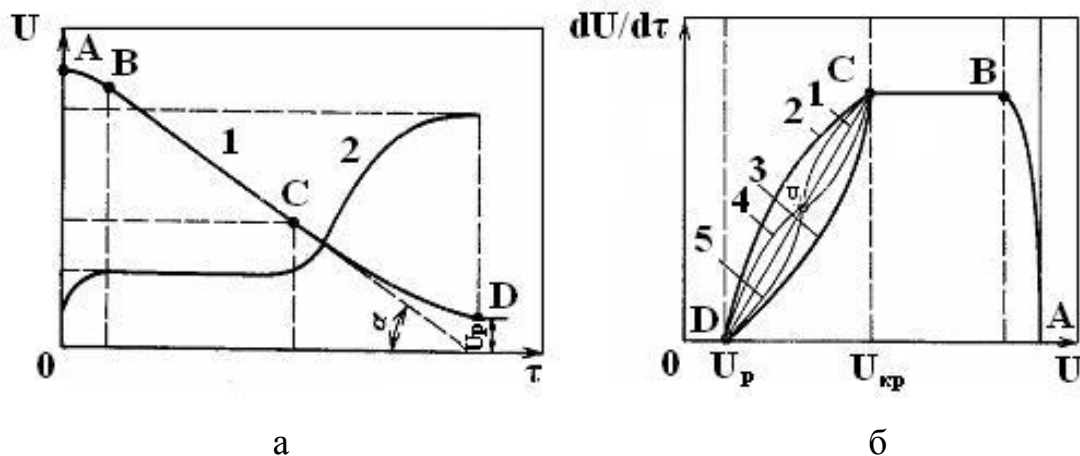


Рисунок 1.2 – Графічне зображення кінетики сушіння: а – криві сушіння (1) і нагрівання (2) матеріалу, який висушується; б – крива швидкості сушіння: АВ – нагрівання матеріалу; ВС, CD – періоди постійної і спадаючої швидкості

Криві швидкості в період спадаючої швидкості (рисунок 1.2, б, криві 1–5) бувають різної конфігурації і форми, що впливає на форму зв'язку вологи з матеріалом і на вплив різних факторів на процес. Крива 1 характерна для тонких пористих ма-

теріалів, крива 2 – для сушіння колоїдних тіл, крива 3 – для капілярно-пористих матеріалів. Криві 4 та 5 описують швидкість сушіння для більш складних по своїй структурі матеріалів. Результати експериментів [28] стосовно сушіння капілярно-пористих матеріалів підтверджують характер кривої швидкості процесу і свідчать, що сушіння продукту після випару основної маси вологи з матеріалу відбувається в другому періоді, тобто у режимі спадаючої швидкості (рисунок 1.3).

Період нагрівання, як правило, незначний за часом, порівняно з наступними періодами сушіння, тому для першого періоду умови постійності швидкості процесу мають вигляд [28]:

$$N = -\frac{dx}{d\tau}, \quad (1.7)$$

де x – вологість матеріалу.

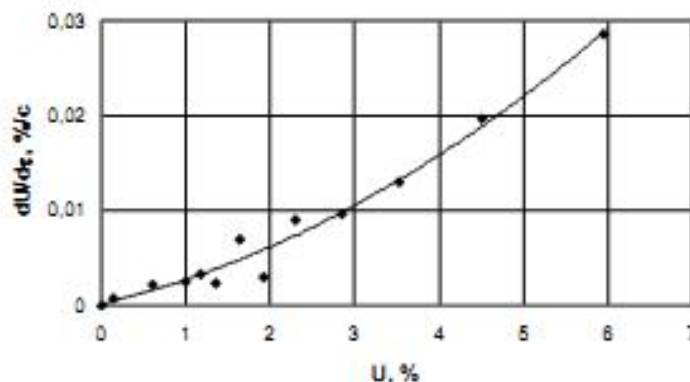


Рисунок 1.3 – Залежність швидкості сушіння від вологості матеріалу

Рівняння для визначення швидкості сушіння у другому періоді [28]:

$$-\frac{dx}{d\tau} = K(x - x_p) = \chi \cdot N(x - x_p), \quad (1.8)$$

де K – коефіцієнт швидкості сушіння; x_p – рівноважна або кінцева вологість; χ – відносний коефіцієнт сушіння, який залежить від властивостей матеріалу.

Інтегрування рівняння (1.8) за початкових умов, які відповідають третьому періоду сушіння, дозволяє отримати експоненціальну залежність між вологістю матеріалу і часом [28].

Робота [29] присвячена дослідженню кінетики сушіння фармацевтичних сумішей, в якій автор пропонує апроксимацію кривих сушіння у вигляді:

$$U = A \exp(B\tau), \quad (1.9)$$

де A , B – константи, які залежать від типу матеріалу, початкового вологовмісту і маси, температури сушильного агента.

Основними параметрами впливу на процес сушіння є температура, вологість і швидкість сушильного агента. На основі теоретичних і експериментальних даних показано [25–29], що параметри матеріалу і сушильного агента, що контактує з ним, тісно пов'язані, причому за станом сушильного агента можна обчислити параметри матеріалу.

Робота [30] присвячена дослідженню кінетики конвективного сушіння гранульованих та плівкових полімерних матеріалів. Відповідно до системного підходу при розгляді процесу глибокого конвективного сушіння гранульованих полімерних матеріалів загальна кінетична задача декомпозована на два основні підрівні: мікро- і макрокінетичний. На нижньому (мікрокінетичному рівні) розглядається кінетика сушіння одиначної частинки полімеру або елементарного (диференціально тонкого) шару. Для опису мікрокінетики вибирається рухома (лагранжева) система координат, яка пов'язана з даною частинкою, що переміщується по апарату. На верхньому (макрокінетичному) підрівні враховуються конструктивні, тепломасообмінні і гідродинамічні особливості даного типу апарата (тип і конструкція апарата, схема руху взаємодіючих фаз, умови теплообміну та ін.).

Закономірності зневоднення матеріалів при їх багатоступеневому контакті з сушильним агентом, який змінює свої властивості на даний час досліджені недостатньо. На кожному зі ступенів поличної сушарки інтенсивність видалення вологи є різною і кінетика сушіння на окремих ступенях потребує додаткового вивчення.

1.3 Конструктивне оформлення сушарок зваженого шару для дисперсних матеріалів

Найбільш широко в хімічній технології розповсюджений конвективний спосіб сушіння, який передбачає передачу тепла від теплоносія (повітря, інертні та димові гази) до поверхні вологого матеріалу під час його нагрівання.

Одним із способів конвективного сушіння є контакт матеріалу з теплоносієм у стаціонарному, напівзваженому або зваженому, який може здійснюватись в барабанних сушарках, апаратах з киплячим шаром, пневматичних трубах-сушарках та апаратах інших конструкцій [31, 32].

Сучасне виробництво потребує створення нових енергозберігаючих та ресурсозберігаючих технологій сушіння дисперсних матеріалів з метою отримання продукції високої якості, збільшення питомої потужності виробництва, зменшення габаритів обладнання, підвищення інтенсивності процесу. У зв'язку з цим перед науковцями постає досить актуальна проблема – вдосконалення способів сушіння та створення ефективних сушарок [33].

Для сушіння дисперсних матеріалів використовують різні способи з певними енерговитратами на їх проведення (рисунок 1.4).

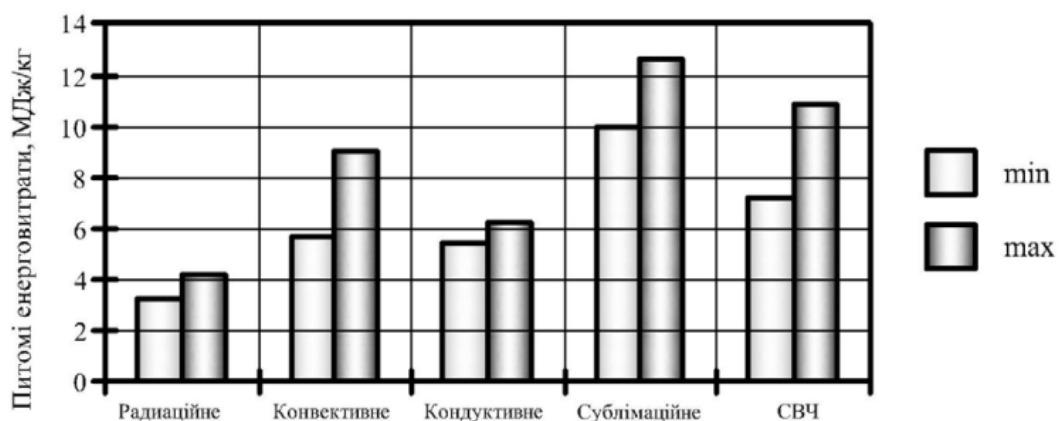


Рисунок 1.4 – Порівняння питомих енерговитрат за різних способів сушіння

Хоча енерговитрати під час сушіння конвективним способом не є найнижчими, але за рахунок інших численних переваг для сушіння дисперсних матеріалів найчастіше використовуються саме конвективні сушарки [34, 35]. Забезпечення ак-

тивного гідродинамічного режиму в сушарках даного типу сприяє інтенсифікації процесу без зниження економічної ефективності їх роботи та має такі переваги [36]:

- гідродинамічна стійкість процесу;
- збільшення відносної швидкості руху взаємодіючих фаз;
- розвинена поверхня взаємодії контактуючих фаз;
- наближення гідродинамічної моделі потоків в апараті до моделі ідеального витіснення;
- зменшення енергоємності процесу та металоємності апаратів.

Вибір типу сушарки визначається, насамперед, її продуктивністю, вартістю енергії та конструкційних матеріалів, безпекою при роботі, надійністю, можливістю контролю технологічних параметрів, надійністю експлуатації і наявністю відповідного транспортного обладнання.

На теперішній час широке застосування отримали більш ефективні сушарки, в яких матеріал висушується у зваженому або псевдозрідженому стані. Цей спосіб має великі переваги над іншими [37–40], наприклад:

- рівномірне нагрівання продукту, який дозволяє застосовувати високі температури сушильного агента;
- інтенсивний рух, близький до ідеального перемішування частинок;
- максимальна поверхня випаровування;
- малий гідравлічний опір шару продукту;
- простота конструкції і зручність експлуатації та інші.

За конструктивними ознаками сушарки зваженого шару поділяють на дві групи: одно- і багатоканальні. Найбільше поширення в застосуванні набули саме одноканальні сушарки.

Аналізом літературних джерел [2,13,41–61] визначено наступну класифікацію сушарок зваженого шару яка представлена в таблиці 1.1. В основу класифікації покладено як конструктивні ознаки обладнання, так і його основні функції (лише цільовий процес зневоднення чи його супроводження додатковими операціями), тип зваженого шару, особливості організації руху сушильного агента тощо.

Таблиця 1.1 – Класифікація сушарок зваженого шару

Функціональна ознака	Обладнання
1. За призначенням:	сушарка; циклонна сушарка; гранулятор-сушарка; сушарка-охолоджувач; сушарка-класифікатор; сушарка-подрібнювач.
2. За типом зваженого шару:	псевдозріджений; пневмотранспорт; віброкиплячий; вихровий; фонтануючий; комбінований.
3. За формою корпусу (камери):	конічний; циліндричний; циліндро-конічний; прямокутний; призматичний.
4. За напрямком руху потоків:	прямотечійний; протитечійний; перехресно-течійний; змішаний.
5. За конструктивними ознаками:	однокамерні; багатокамерні.
6. За типом газорозподільної решітки:	провальні; безпровальні (ковпачкові, двошарові, багатошарові).
7. За характером руху матеріалу:	з направленим рухом матеріалу від місця завантаження до місця розвантаження; без направлено руху матеріалу від місця завантаження до місця розвантаження.
8. За характером циркуляції теплоносія:	з природною циркуляцією; з примусовою циркуляцією.
9. За режимом роботи:	періодичної дії; безперервної дії.
10. За наявністю контактних елементів у робочому об'ємі сушарки:	поличні; ситчасті провальні; спіралеподібні та ін.

Нижче представлено опис основних конструкцій сушарок зваженого шару.

Основними перевагами циклонної сушарки [41] є те, що така конструкція апарата дозволяє забезпечити нестационарні умови взаємодії фаз, тим самим високу інтенсивність тепло- та масопередачі, гарантований час перебування продукту в

апараті, достатній для реалізації процесу, компактність сушарки в порівнянні з трубо-сушаркою. Недоліками такої конструкції є те, що їх можна застосовувати лише для добре сипучих матеріалів, у яких відсутні значні адгезійно-когезійні властивості. Матеріали з такими явними властивостями можуть налипати на внутрішню поверхню циклонної камери за рахунок наявності відцентрового поля газосуспензії.

Переваги пневмотранспортної труби-сушарки [13]: наявність активного гідродинамічного режиму в апараті, відсутність відцентрового поля газосуспензії для сушіння матеріалів з явними адгезійно-когезійними властивостями (наприклад, сушіння мінеральних різних солей). Недоліки пневматичних сушарок: великі швидкості руху сушильного агента, а значить і значні затрати енергії; прямоочний рух фаз, який знижує рушійну силу процесу на виході з апарата.

Аерофонтанні сушарки [42] використовують як апарати, які здатні працювати зі значною порізністю шару і з виносом сухого матеріалу.

Переваги вихрових сушарок [41]: простота конструкції, необхідна утримувальна здатність (кількість матеріалу в об'ємі камери), яка визначає час перебування продукту у вихровій камері, низький гідравлічний опір, мала металоємність та габарити сушарки при високій інтенсивності сушіння. У вихровій сушарці-подрібнювачі [41] відбувається сушіння з одночасною дезагрегацією або подрібненням кускових і агрегованих матеріалів.

Перевагами багатofункціональних апаратів, наприклад, для зневоднення та гранулювання розчинів солей та суспензій деяких хімічних продуктів [2] є те, що при досить невеликих матеріальних витратах вирішується питання отримання продукту у вигляді гранул, оскільки в одному апараті можна поєднати три стадії: упарювання розчину, утворення гранул продукту, сушіння готових гранул, а також подальше їх охолодження.

Одним з напрямів інтенсифікації тепломасообмінних процесів є використання різного типу збуджень потоків, зокрема, вібрації. Вібросушарка з «киплячим» шаром фірми «Ешер Вісс» (ФРН) характеризується такими перевагами [43]: питома витрата повітря на одиницю площі газороздільної камери менша ніж в сушарках з киплячим шаром, що є важливим при сушінні крупнодисперсних матеріалів, та ма-

теріалів, що погано зріджуються, завдяки віброкиплячому шару досягається більш чітке регулювання середнього часу перебування матеріалу у зоні сушіння, зменшене винесення пилу.

Переваги сушарки з «киплячим» шаром [13]: тривалий час перебування матеріалу в апараті, розвинута поверхня контакту фаз, інтенсивне перемішування вологого матеріалу, що заходить в апарат, з сухим матеріалом, який знаходиться на решітці, простота конструкції.

Різновидом сушарок «киплячого» шару в напрямі вдосконалення конструкції газорозподільного вузла є апарати з рухомими решітками [41]. Переваги сушарки «киплячого» шару з рухомою решіткою: даний апарат використовують для сушіння полімерів, що створюють волокна, які близькі за своїми фізико-механічними властивостями до пастоподібних матеріалів. При цьому рухома решітка виконує роль гранулятора.

Технічне рішення організованого киплячого шару у однокамерній сушарці розробила фірма «Ніро Атомайзер» (Данія) [43]. Перевагою даної сушарки є повна відсутність застійних зон, яких не можна уникнути в камерах прямокутної форми або з зигзагоподібною направляючою перегородкою, сушильна камера більш компактна. Установки такого типу використовують для виробництва полімерних матеріалів, а саме, полівінілхлориду, поліетилену, поліпропілену.

Організація направлено переміщення матеріалу, який висушується у однокамерних сушарках, полягає у використанні призматичної форми камери. По такій схемі працюють сушарки, які випускають фірми «Бюттнер» (ФРН), «Линк-Белт» (США) [42]. Перевагами сушарок такого типу є те, що за рахунок розширення перерізу камери у верхній її частині, відбувається сепарація частинок різного розміру, більш менші частинки знаходяться у верхній частині шару, тому менш схильні до перегріву. Також безперервне переміщення частинок вздовж камери забезпечується завдяки нахилу і деякого зменшення ширини решітки у бік вивантаження. Сушарки такого типу застосовують для сушіння вугілля, рудних концентратів, зернових продуктів.

Широке застосування на виробництві набули конвективні сушарки, різні за конструкціями та призначенням. Прикладом сушильної установки, що складається з різних за принципом дії конвективних сушарок, є комбінована аерофонтанна сушарка [41]. Перевагами сушарки є її використання для матеріалів з високим початковим вологовмістом, які мають вільну і зв'язану вологу та яскраво виражені адгезійно-когезійні властивості, простота конструкції. Значне застосування сушарок такого типу набуло у виробництві ряду барвників, полімерних матеріалів, у хіміко-фармацевтичному виробництві.

Перевагами багатокамерної прямокутної сушарки фірми системи «Турбо-Фло» [42] є те, що одночасно в одних камерах сушарки протікає основний процес сушіння, а в інших матеріал досушується за рахунок акумульованого тепла, а потім охолоджується. Дані апарати, що характеризуються невеликою висотою і невисокою вартістю, дають змогу отримувати рівномірний по вологості продукт.

Перевагами багатокамерної сушарки з вертикальним секціонуванням за допомогою ряду полиць, на які натягнуті сітки [42] є ступінчасто-протитечійний рух теплоносія та матеріалу, що висушується, також відбувається одночасний процес сушіння та охолодження продукту. Сушарка призначена для сушіння зерна, а також може бути використана для сушіння хімічних продуктів. Недоліками даної конструкції є значні питомі витрати повітря, так як процес сушіння завершується вже у першій камері, складна конструкція.

Перевагами конічної поличної сушарки-пневмокласифікатора [13] є здатність під час сушіння знепилювати продукт, а при необхідності розділяти його за крупністю на два сорти. Верхня частина апарата має конічну форму для збільшення часу перебування дрібних частинок, що виносяться потоком.

Перевагою поличної пневматичної сушарки-пневмокласифікатора [13] є те, що її корпус складається з двох з'єднаних між собою частин – висхідної та низхідної з метою зменшення висоти апарата. За рахунок такої конструкції, а саме за наявності спільних стінок, зменшується зовнішня поверхня сушарки, а також її металоемність та вартість. Також зменшуються витрати тепла у навколишнє середовище. Недоліком апарата є складна його конструкція.

Аналіз приведених конструкцій сушарок із зваженим шаром показав наявність певних переваг та недоліків їх застосування щодо сушіння матеріалів з різними властивостями. Кожен з виділених типів обладнання характеризується різним ступенем енергетичних і матеріальних витрат та інтенсивністю проведення процесу. Для процесу сушіння у зваженому шарі найбільш перспективними є поличні апарати, які характеризуються вищою інтенсивністю та ефективністю процесу за рахунок реалізації у робочому просторі активного аеродинамічного режиму. Разом з тим ці апарати потребують більш глибокого вивчення як перспективного напрямку організації процесу сушіння дисперсних матеріалів. Універсальність конструкцій поличних сушарок робить ці апарати конкурентоздатними з іншими сушарками.

1.4 Вирішення проблеми енергозбереження в процесах сушіння

Кожний із вказаних вище типів обладнання характеризується певними недоліками: барабанні сушарки та апарати з киплячим шаром мають великі габарити та значну енергоємність, пневматичні труби-сушарки не забезпечують необхідний час контакту вологого матеріалу з теплоносієм та характеризуються великою висотою [62]. Перспективним напрямком в удосконаленні сушильного обладнання є створення комбінованих конструкцій апаратів з активним гідродинамічним режимом, під час якого інтенсифікація тепломасообміну досягається з мінімальними енерговитратами на підтримку зваженого шару [63, 64]. Ефективним методом інтенсифікації процесу є організація локальних, протитечійних та/або комбінованих режимів взаємодії потоку сушильного агента з продуктом, а також підбір оптимального способу введення сушильного агента в робочий простір апарата та його вторинне застосування [65, 66].

Конвективне сушіння зв'язане з необхідністю переміщення великих об'ємів сушильного агента. Завдяки цьому виникає велика матеріальна та екологічна проблема – значні втрати теплової енергії з відпрацьованим сушильним агентом, особливо під час сушіння матеріалів з підвищеною вологістю [67, 68]. В результаті ці втрати становлять 70 % від загальних втрат під час сушіння [69]. Виникає необхід-

ність утилізації та повторного використання тепла відпрацьованого сушильного агента [70]. Аналіз літературних даних [71, 72] показав, що енергетичний аналіз сушильної техніки потребує більш ретельного вивчення.

Три групи факторів впливають на ефективність сушіння нагрітим повітрям:

- умови навколишнього середовища;
- вид матеріалу, що піддається сушінню;
- конструкція сушарки і її робота.

Будь-яка модернізація сушарки, що дає змогу підвищити її продуктивність, у тому числі і інтенсифікувати процес, в тій чи іншій мірі сприяє зменшенню витрат палива на сушіння. Класифікація шляхів інтенсифікації процесу сушіння дисперсних матеріалів, якою слід керуватися під час реконструкції діючих або при розробці нових конструкцій сушарок [73, 74], зображена на рисунку 1.5.

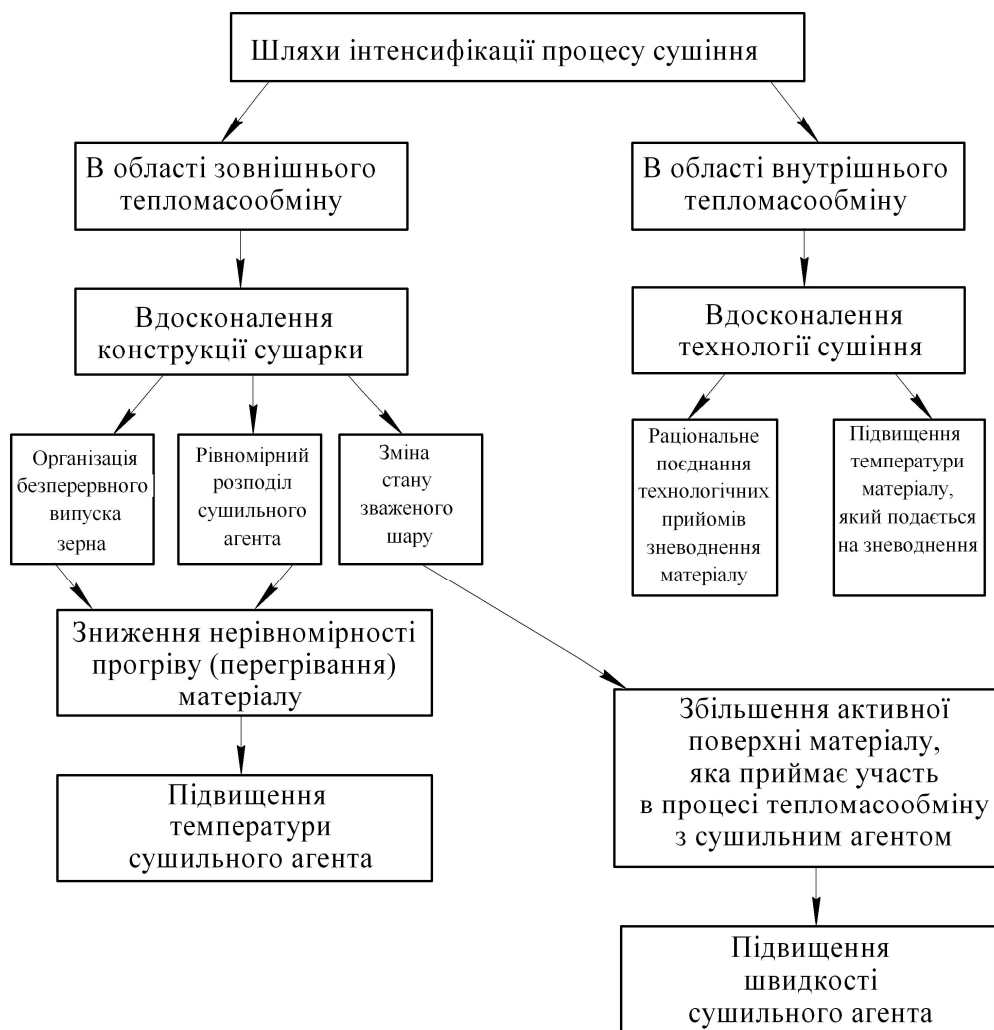


Рисунок 1.5 – Класифікація шляхів інтенсифікації процесу сушіння дисперсних матеріалів

Літературний аналіз автора [38] показав існування таких заходів, щодо зменшення енерговитрат на сушіння дисперсних матеріалів:

1. Для зменшення витрат теплоти на випар вологи необхідно:

- удосконалення технології сушіння дисперсних матеріалів;
- удосконалення конструкцій сушарок для дисперсних матеріалів;
- автоматизація процесу сушіння.

2. Для зменшення втрат теплоти із гарячим матеріалом після його сушіння необхідно:

- удосконалення процесу охолодження висушеного дисперсного матеріалу;
- удосконалення конструкції охолоджувача.

3. Для зменшення втрат теплоти з відпрацьованим сушильним агентом (і повітрям), необхідно:

- повторне використання теплоти відпрацьованого сушильного агента;
- удосконалення конструкцій сушарок;
- автоматизація процесу сушіння.

4. Для зменшення втрат теплоти у навколишнє середовище через нагріті поверхні, у тому числі на нагрівання транспортних засобів необхідна:

– установка сушарок у металевому виконанні у теплоізольованих приміщеннях;

- теплоізоляція зовнішніх поверхонь сушильних агрегатів;
- правильний вибір вогнестійких та теплоізоляційних матеріалів;
- використання теплоти зовнішніх поверхонь топків для нагрівання повітря, яке подається у топку. Заміна громіздких топків декількома малогабаритними топками (або теплогенераторами), які безпосередньо прилягають до зон сушіння.

5. Для зменшення втрат теплоти від неповного згорання палива необхідно:

- контроль і автоматизація процесу згорання палива;
- правильна технічна експлуатація топків (особливо в періоди запуску і виходу на потрібні режими).

Нагальним аспектом для зменшення витрат на процес сушіння є економія електроенергії для проведення процесу. Для зниження витрат електроенергії на су-

шіння дисперсних матеріалів необхідні заходи, які дозволяють отримати такі результати:

- удосконалення схем сушарок і коефіцієнтів ефективності їх використання;
- впровадження більш удосконаленої технології ре циркуляційної сушарки.

Автор роботи [75] в своїх дослідях, які присвячені сушінню насіння кукурудзи, пропонує такі заходи щодо покращення технології процесу та вирішення питань енергозбереження:

- попереднє прогрівання качанів;
- паралельне продування камер;
- диференційований тепловий режим;
- максимально допустима температура;
- реверсування і рециркуляція агента сушіння, в тому числі відпрацьованого.

Аналіз результатів дослідів автора показав, що для промислового насінництва слід застосовувати рециркуляцію агента сушіння з періодичною зміною напрямку продування сушильних камер. Цей спосіб дозволяє знизити витрати енергоносіїв на 20–26% порівняно із типовими режимами.

В конвективному сушінні дисперсних матеріалів рекуперацію тепла найбільш доцільно здійснювати такими способами [38]:

- утилізацією фізичного тепла газів, що відходять. Це досягається частковою рециркуляцією цих газів;
- утилізацією фізичного тепла газів, що відходять, з використанням проміжного теплоносія;
- утилізацією фізичного тепла висушеного продукту під дією прямого теплообміну з ним вихідного сушильного агента.

Усі ці способи зображені на рисунку 1.6.

В гравітаційних поличних сушарках за рахунок багаторазового контакту дисперсного матеріалу із сушильним агентом досягається зменшення витрат енергії на одиницю видаленої вологи. Становить інтерес вивчення ефективності видалення вологи на кожному зі ступенів сушарки при різних початкових характеристиках сушильного агента і організації його руху та конструкції поличних контактів.

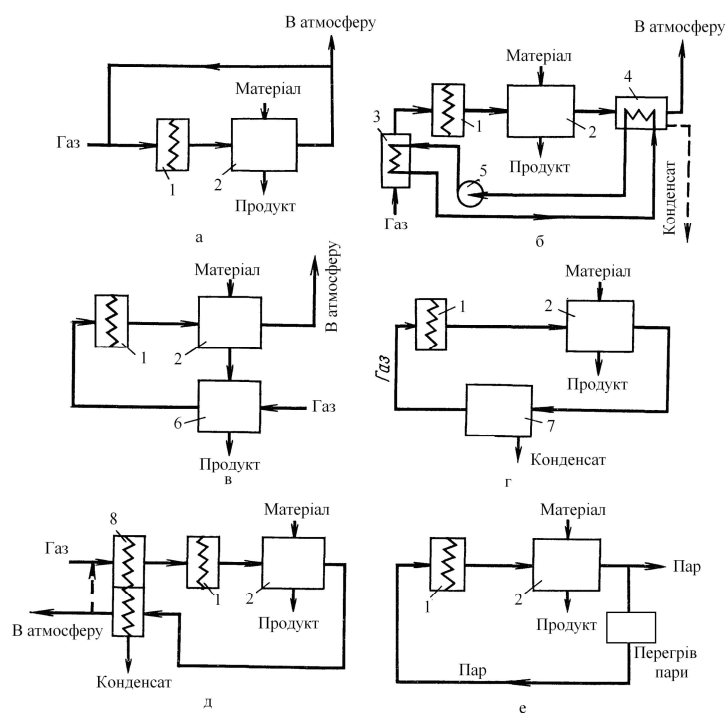


Рисунок 1.6 – Блок-схеми сушіння з рекуперацією тепла при використанні рециркуляції газу (а), проміжного рідкого теплоносія (б), теплообміну сушильного агента з висушеним продуктом (в), замкнутого циклу сушильного агента (г), теплообміну з використанням теплових труб (д) та перегрітого пару в якості сушильного агента (е): 1 – підігрівач газу; 2 – сушарка; 3, 4 – теплообмінні апарати поверхневого типу; 5 – насос; 6 – теплообмінник системи «тверде-газ»; 7 – конденсатор; 8 – теплообмінний апарат з тепловими трубами

1.5 Висновки до першого розділу, постановка задач досліджень

Проведено огляд основних гідродинамічних закономірностей процесу сушіння у зваженому шарі, визначено особливості кінетики процесу сушіння; на базі огляду сформульовано основні перспективи подальшого розвитку способів сушіння. Аналіз літературних даних, в яких представлений опис основних законів проведення процесів сушіння у зваженому шарі, виявив можливість ефективного застосування апаратури такого типу після вирішення проблеми нерівномірності швидкості руху дисперсних частинок, деформації температурного (концентраційного) профілю в поперечному перерізі апарата та пов'язане з цим зниження якості обробленого мате-

ріалу. На основі аналізу експериментально-теоретичних матеріалів, проведених у першому розділі, виявлено також недоліки в апаратурному оформленні апаратів зваженого шару [76–79]:

1. Нерівномірність часу перебування у зваженому шарі дисперсних частинок і зріджувального сушильного агента (однаково можливі швидке проскакування частинок і їх перебування в шарі довше за середньостатистичний визначений час).

2. Неможливість управління рухом дисперсної частинки в разі необхідності забезпечення короткочасного (в разі сушіння матеріалів, які змінюють свою структуру при довгочасному сушінні) або пролонгованого (в разі необхідності забезпечення більш глибокого сушіння) контакту з сушильним агентом.

3. Можлива небажана зміна властивостей твердих частинок (стирання, розтріскування, злипання та ін.).

4. Обов'язкова присутність в складі технологічної схеми потужних пиловловлюючих апаратів на виході газів із зваженого шару, особливо при широкому фракційному складі твердої фази.

5. Ерозія апаратури в зоні зваженого шару, особливо значна у разі використання частинок з високими абразивними властивостями.

6. Підвищені енерговитрати, пов'язані з нагнітанням сушильного агента та недостатній утилізації тепла після проведення процесу сушіння.

7. Низька стабільність зваженого шару в широкому діапазоні зміни навантажень по суцільній та дисперсній фазах.

Узагальнення та зіставлення окремих результатів попередніх авторів у цій області дають можливість зменшити вплив факторів, що дестабілізують процес сушіння, запропонувавши нову конструкцію сушильних пристроїв зі стабільними гідро- та термодинамічними показниками шляхом вертикального секціонування внутрішнього простору шляхом встановлення каскаду перфорованих полиць під визначеним кутом; при цьому створюються умови гравітаційного руху матеріалу вздовж полиць та його пересипання з однієї полиці на іншу [80]. На кожній з полиць в такій конструкції створюється ефективне перемішування, властиве зваженому шару, при збереженні переваг організованого протитечійного режиму [81].

Поличні контактні елементи можна переміщувати всередині апарата і демонтувати для заміни; можна легко змінювати положення полиць, їх конструктивні параметри і число; вони не мають спеціальних перевантажувальних пристроїв, менш схильні до забивання. Поличні елементи, підвищуючи швидкість і турбулентність газового потоку і створюючи вихровий рух твердих частинок, збільшують інтенсивність контакту фаз. Зміна живого перерізу полиці, кута її нахилу, відстані від кінця полиці до стінки апарата (ширини розвантажувального простору), а також числа полиць дозволяє впливати на інтенсивність контакту фаз і створювати в робочому об'ємі апарата різні гідродинамічні режими роботи зваженого шару як на окремих полицях, так і по висоті апарата. На перфорованих полицях можливо ефективно проводити одночасно технологічні процеси «сушіння-пневмокласифікація», пневмотранспортування матеріалу на задану висоту [82]. Застосування поличних контактних елементів надає можливість здійснювати процеси підготовки матеріалу до обробки, наприклад, знепилювання [83].

В той же час існують значні резерви підвищення ефективності подібних апаратів після вирішення проблеми нерівномірності швидкості руху дисперсних частинок, деформації температурного (концентраційного) профілю в поперечному перерізі апарата та пов'язане з цим зниження якості обробленого матеріалу. Сегрегація полідисперсних частинок також сприяє зменшенню швидкості руху потоку поблизу стінок і негативно впливає на процеси тепломасообміну.

Гравітаційні тепломасообмінні апарати з протитечійним рухом взаємодіючих потоків знайшли застосування при сушінні, охолодженні, пневмокласифікації та інших процесах обробки дисперсних матеріалів в хімічній, фармацевтичній, харчовій та інших галузях промисловості [84–87]. Завдяки технологічним перевагам відносно простих конструктивних рішень доля гравітаційних охолоджуючих апаратів досягає майже 90 % виробничої потужності підприємств мінеральних добрив.

Зважаючи на те, що в існуючих літературних джерелах недостатньо уваги приділено застосуванню апаратів поличного типу для проведення процесу сушіння, визначення оптимальних гідродинамічних та термодинамічних умов, вибір енергоефективної схеми руху сушильного агента, впливає доцільність комплексного дос-

лідження методу сушіння у вертикально-секціонованих гравітаційних апаратах зваженого шару і створення вдосконалених конструкцій для його здійснення.

Удосконалення гравітаційних апаратів може бути досягнуте низкою запропонованих заходів, зокрема:

- секціонуванням внутрішнього простору апарата з утворенням окремих ступенів процесу тепломасообміну;
- диференційованим розподілом взаємодіючих потоків між ступенями;
- поступеним регулюванням величини рушійної сили тепломасообміну;
- оптимізацією співвідношення витрат взаємодіючих потоків;
- створенням активного гідродинамічного режиму взаємодії потоків;
- зменшенням питомих енерговитрат на інтенсифікацію процесу.

Слід виділити такі переваги багатоступеневих сушарок зваженого шару поличного типу:

1. Створення протитечійного режиму руху взаємодіючих потоків, який є найбільш ефективним і передбачає найбільше значення середньої рушійної сили (середньої різниці температур $\Delta t_{сер}$ і концентрацій $\Delta c_{сер}$).

2. Можливість одночасного проведення процесу сушіння і класифікації матеріалу в одному апараті.

3. Зменшення розмірів апарата за рахунок створення окремих ступенів контакту потоків у об'ємі одного апарата.

4. Можливість управління часом перебування дисперсної фази в об'ємі апарата за рахунок зміни технологічних характеристик процесу сушіння і конструктивних параметрів сушарки.

5. Вторинне використання сушильного агента, що дозволяє скоротити енерговитрати на проведення процесу.

Метою дисертаційної роботи є дослідження закономірностей гідродинаміки дисперсного потоку у вертикальному каналі, секціонованому поличними контактними елементами, та вплив режимних і конструктивних параметрів на інтенсифікацію процесу сушіння в вертикальних гравітаційних поличних сушарках.

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

1. Розроблення фізичної моделі руху сушильного агента та дисперсного матеріалу в робочому просторі поличної сушарки, механізмів зневоднення матеріалу під час сушіння на каскаді полиць.

2. Створення математичної моделі, яка б описувала механізм сушіння дисперсних матеріалів на каскаді полиць гравітаційної поличної сушарки з урахуванням гідродинаміки робочого простору апарата, конструкції полиць, характеристик і способу організації руху сушильного агента.

3. Одержання аналітичних залежностей в результаті розв'язання та аналізу рівнянь математичної моделі з метою прогнозування впливу гідродинамічних та термодинамічних чинників на стабільність руху потоків і процесу сушіння у робочому просторі апарата та його габаритних розмірів.

4. Перевірка й уточнення отриманих теоретичних залежностей експериментальним шляхом.

5. Визначення енергетичної ефективності різних способів організації руху сушильного агента на ступенях поличного апарата, розроблення методики оцінювання енергетичної ефективності зневоднення на каскаді полиць.

6. Розроблення інженерної методики конструктивного розрахунку та проектування поличних сушарок, визначення основних вимог до проведення процесів сушіння за результатами експериментальних і теоретичних залежностей.

7. Створення вдосконалених конструкцій гравітаційних поличних сушарок.

8. Дослідно-промислова апробація розробленого обладнання в промисловій технологічній схемі сушіння.

Основні завдання досліджень та їх результати опубліковані в працях [63–66,68,70,74,82].

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Загальна методика проведення досліджень

Для досягнення поставленої мети дисертаційної роботи проведено математичне моделювання гідродинаміки взаємодіючих потоків у поличній сушарці зваженого шару, а також кінетики процесу сушіння. Експериментально досліджено гідродинаміку потоків у робочому просторі поличної сушарки та ефективність процесу сушіння дисперсних матеріалів. Проведено аналіз отриманих експериментальних результатів та розроблено методику інженерного розрахунку, що включає розрахунок механізму зневоднення одиночної частинки, гідродинамічний розрахунок робочого простору поличної сушарки та розрахунок температурно-вологісних показників процесу сушіння дисперсних матеріалів на каскаді полиць сушарки.

На етапі зіставлення результатів теоретичних та експериментальних досліджень з результатами комп'ютерного моделювання застосовано системи тривимірного твердотілого моделювання КОМПАС-3D [88] (створення тривимірних моделей) та програмний продукт ANSYS [89] (розрахунок чисельними методами). Побудову теоретичних залежностей виконано диференціальними методами математичного аналізу та інтегрального обчислення.

Експериментальні дослідження проведено з метою перевірки адекватності запропонованої математичної моделі. Адекватність отриманих розрахункових залежностей для процесу, що досліджувався, обумовлена застосуванням математичних моделей, що базуються на фундаментальних положеннях механіки рідини та газу, кінетики тепломасообміну, а також зіставленням розрахункових даних з відомими та особисто отриманими результатами експерименту. Достовірність отриманих результатів експериментальних досліджень визначається оцінюванням похибок та довірчих інтервалів при верифікації результатів.

2.2 Методи і засоби математичного моделювання

Математичне моделювання гідродинаміки руху потоків здійснювалося на базі класичних положень механіки рідини та газу і технічної гідромеханіки [26, 90]; математичне моделювання кінетики сушіння здійснювалося на базі положень динаміки зневоднення при конвективному сушінні [25, 91]. Розв'язання рівнянь математичної моделі здійснено за допомогою програмного комплексу комп'ютерної алгебри wxMaxima [92]. wxMaxima містить перевірені, надійні та ефективні символічні і чисельні алгоритми для вирішення широкого спектру математичних завдань, включаючи широко відомі бібліотечні чисельні алгоритми компанії NAG (Numeric Algorithm Group).

WxMaxima дозволяє виконувати складні алгебраїчні перетворення та спрощення над полем комплексних чисел, знаходити кінцеві й нескінченні суми, добутки, межі та інтеграли, вирішувати в символічному вигляді та чисельно алгебраїчні (у тому числі трансцендентні) системи рівнянь і нерівностей, знаходити всі корені многочленів, вирішувати аналітично і чисельно системи звичайних диференціальних рівнянь і рівнянь в окремих похідних.

2.3 Будова експериментальної установки

Для проведення експериментів з дослідження гідродинамічних режимних і конструктивних параметрів процесу сушіння у зваженому шарі було спроектовано та виготовлено експериментальну сушильну установку [93], схему якої наведено на рисунку 2.1. Модель установки, її монтажне креслення та фотографія експериментального стенду наведено на рисунку 2.2.

Принцип дії установки такий.

Повітря з навколишнього середовища через забірник засмоктується за рахунок створюваного розрідження вентилятором В (модель ВВД-3) та подається до електрокалорифера К, де відбувається його нагрівання до температури, передбаченої для сушіння дисперсних матеріалів. За рахунок енергії, що отримана повітрям

при проходженні повітродувки, теплоносій по трубопроводу надходить до робочого простору полицної сушарки С і активно контактує з шаром матеріалу, який рухається протитечійно. Вологий дисперсний матеріал із початковою вологістю та температурою подають з бункера ϵ_1 через штуцер у верхню частину апарата. Висушений матеріал вивантажується через нижній штуцер в бункер ϵ_2 зберігання готового продукту. Відпрацьований сушильний агент поступає на очищення в циклон Ц для забезпечення рециркуляції (рециркуляційний потік на схемі не показано).

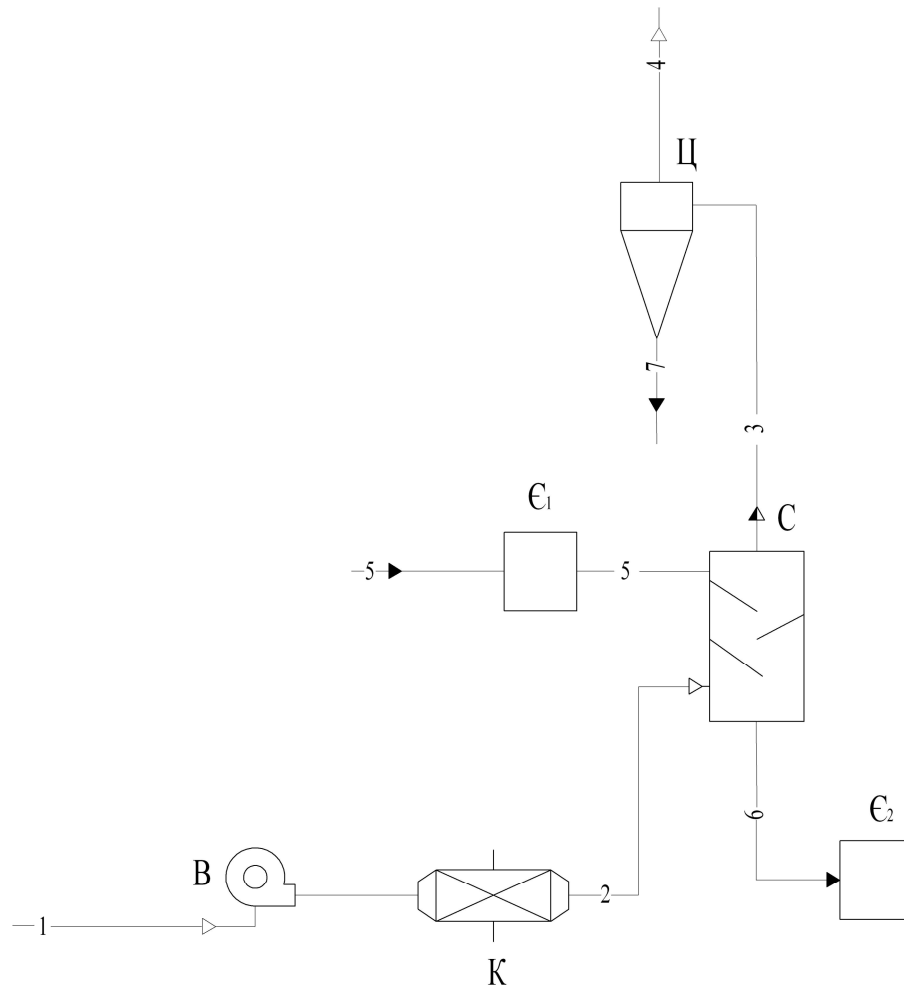
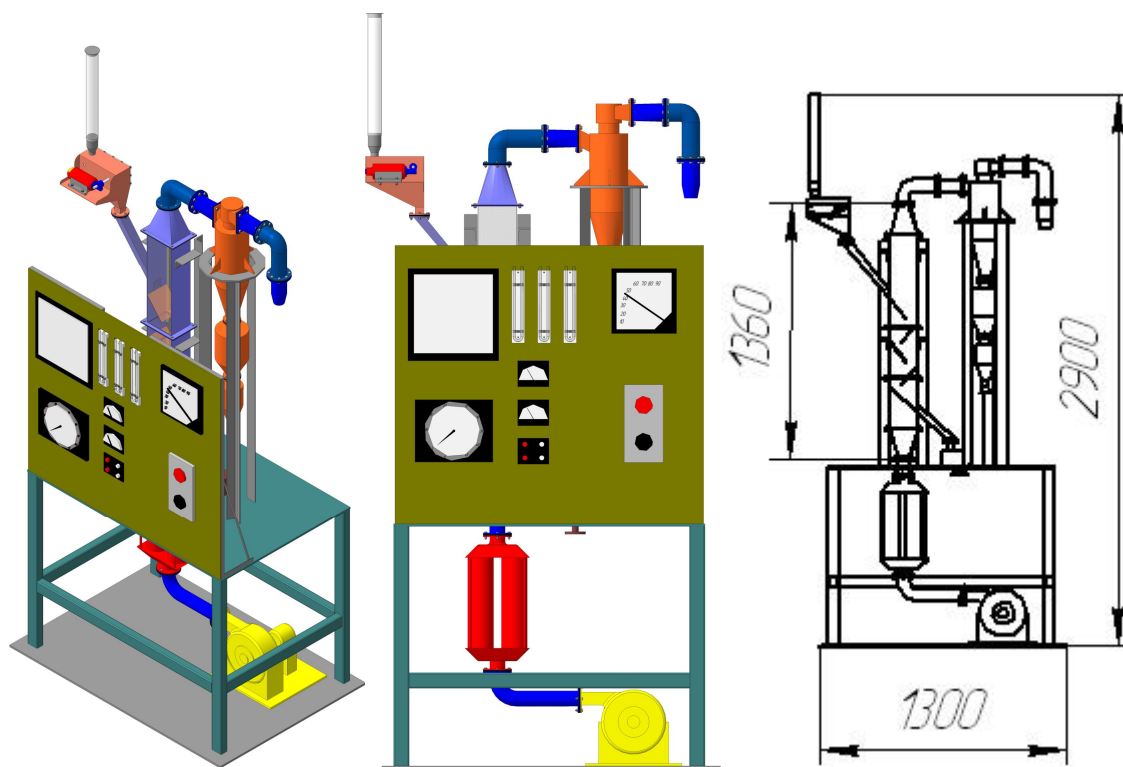


Рисунок 2.1 – Принципова схема експериментальної установки для дослідження гідродинаміки та кінетики процесу сушіння в гравітаційних полицних апаратах: В – вентилятор; К – калорифер; С – гравітаційна полицна сушарка; Ц – циклон; ϵ_1 – ємність для вологого дисперсного матеріалу; ϵ_2 – ємність для висушеного дисперсного матеріалу; 1 – атмосферне повітря; 2 – нагріте атмосферне повітря; 3 – відпрацьоване повітря; 4 – очищене відпрацьоване повітря; 5 – вологий дисперсний матеріал; 6 – висушений дисперсний матеріал; 7 – дрібнодисперсний матеріал



а

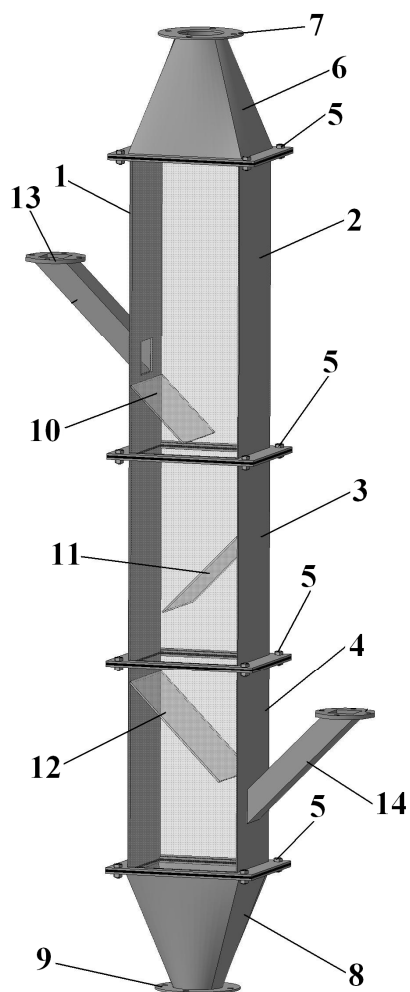


б

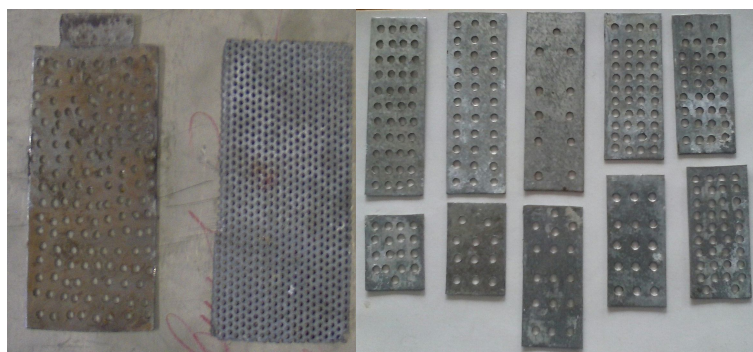


Рисунок 2.2 – Експериментальна установка для дослідження гідродинаміки та кінетики процесу сушіння в гравітаційних поличних апаратах: а – модель установки та монтажне креслення; б – фото установки

Конструкція експериментального зразка гравітаційної поличної сушарки представлена на рисунку 2.3 [82].



а



б

Рисунок 2.3 – Експериментальний зразок гравітаційної поличної сушарки:
а – модель; б – загальний вигляд контактеного ступеню та приклади поличних кон-
тактів різної конструкції

Сушарка складається з корпусу 1 прямокутної форми перерізом 100x50 мм і робочою висотою біля 1 м, що містить окремі царги 2,3,4 – верхню, середню і нижню відповідно, які з'єднані між собою за допомогою кріпильних елементів 5. До верхньої царги 2 за допомогою кріпильних елементів 5 приєднана конічна царга 6, яка обладнана патрубком 7 відводу сушильного агента. До нижньої царги 4 за допомогою кріпильних елементів 5 приєднана конічна царга 8, яка обладнана патрубком 9 відводу висушеного матеріалу. Всередині корпусу 1 нерухомо закріплені

щонайменше три похилі контактні полиці 10, 11, 12 (рисунок 2.3, б), верхня, середня і нижня відповідно з однаковим кутом нахилу, який на $10\text{--}15^\circ$ перевищує величину кута природного відкошу матеріалу. Верхня похила контактна полиця 10 встановлена у верхній царзі 2 з зазором в горизонтальній площині між вільним кінцем полиці та стінкою корпусу 1, який дорівнює 0,5 ширини корпусу 1. Середня похила контактна полиця 11 встановлена у середній царзі 3 з зазором в горизонтальній площині між вільним кінцем полиці та стінкою корпусу 1, який дорівнює 0,3 ширини корпусу 1. Нижня похила контактна полиця 12 встановлена у нижній царзі 4 з зазором в горизонтальній площині між вільним кінцем полиці та стінкою корпусу 1, який дорівнює 0,15 ширини корпусу 1. Пристрій також облаштований прямокутним патрубком 13 для введення матеріалу, який буде висушуватись, і прямокутним патрубком 14 для введення сушильного агента.

Сушарка працює наступним чином.

В нижню царгу 4 через прямокутний патрубок 14 до корпусу 1 пристрою підводиться сушильний агент, який завдяки розташуванню прямокутного патрубка 14 спочатку рівномірно розподіляється по перерізу корпусу 1, а потім піднімається вгору.

По мірі руху сушильного агента вгору по корпусу 1 він послідовно проходить по перерізам нижньої царги 4, середньої царги 3 і верхньої царги 2, конічної царги 6 і відводиться з пристрою через патрубок 7.

Одночасно з введенням сушильного агента до корпусу 1 пристрою через прямокутний патрубок 13 у верхній царзі 2 на верхню похилу контактну полицю 10 вводиться дисперсний матеріал для сушіння. На верхній похилій контактній полиці 10 під час протитечійної взаємодії з потоком сушильного агента відбувається нагрівання дисперсного матеріалу та видалення дрібної фракції з метою вирівнювання значення порізності зваженого шару. Довжина верхньої похилої контактної полиці 10 забезпечує такий час перебування дисперсного матеріалу, який сприяє повному прогріванню матеріалу, сепарації дрібних дисперсних частинок та початку видалення незв'язаної вологи з поверхневого шару дисперсного матеріалу в періоді постійної швидкості сушіння. Дисперсний матеріал під час сушіння потоком су-

сушильного агента поступово рухається по верхній похилій контактній полиці 10, відводиться через вільний її кінець та надходить до середньої похилої контактної полиці 11 у середній царзі 3. По мірі переміщення дисперсного матеріалу по середній похилій контактній полиці 11 відбувається подальше інтенсивне видалення нез'язаної вологи з поверхневого шару дисперсного матеріалу в періоді постійної швидкості сушіння в результаті протитечійної взаємодії з потоком сушильного агента. Дисперсний матеріал під час сушіння потоком сушильного агента поступово рухається по середній похилій контактній полиці 11, відводиться через вільний її кінець та надходить до нижньої похилої контактної полиці 12 у нижній царзі 4. По мірі переміщення дисперсного матеріалу по нижній похилій контактній полиці в результаті протитечійної взаємодії з потоком сушильного агента відбувається видалення зв'язаної вологи з глибини матеріалу в періоді спадання швидкості сушіння. Дисперсний матеріал під час сушіння потоком сушильного агента поступово рухається по нижній похилій контактній полиці 12, відводиться через вільний її кінець та надходить до патрубку 9 відводу висушеного матеріалу, який розташовано в кінчній царзі 8.

В основу фізичного моделювання покладено методи теорії подібності. У досліджах 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 частинок та їх траєкторій у натурі та в моделі.

2.4 Методика проведення експериментальних досліджень

Фізичний експеримент проведено шляхом експериментальних досліджень стендових зразків сушильного 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 рисунку 2.4.

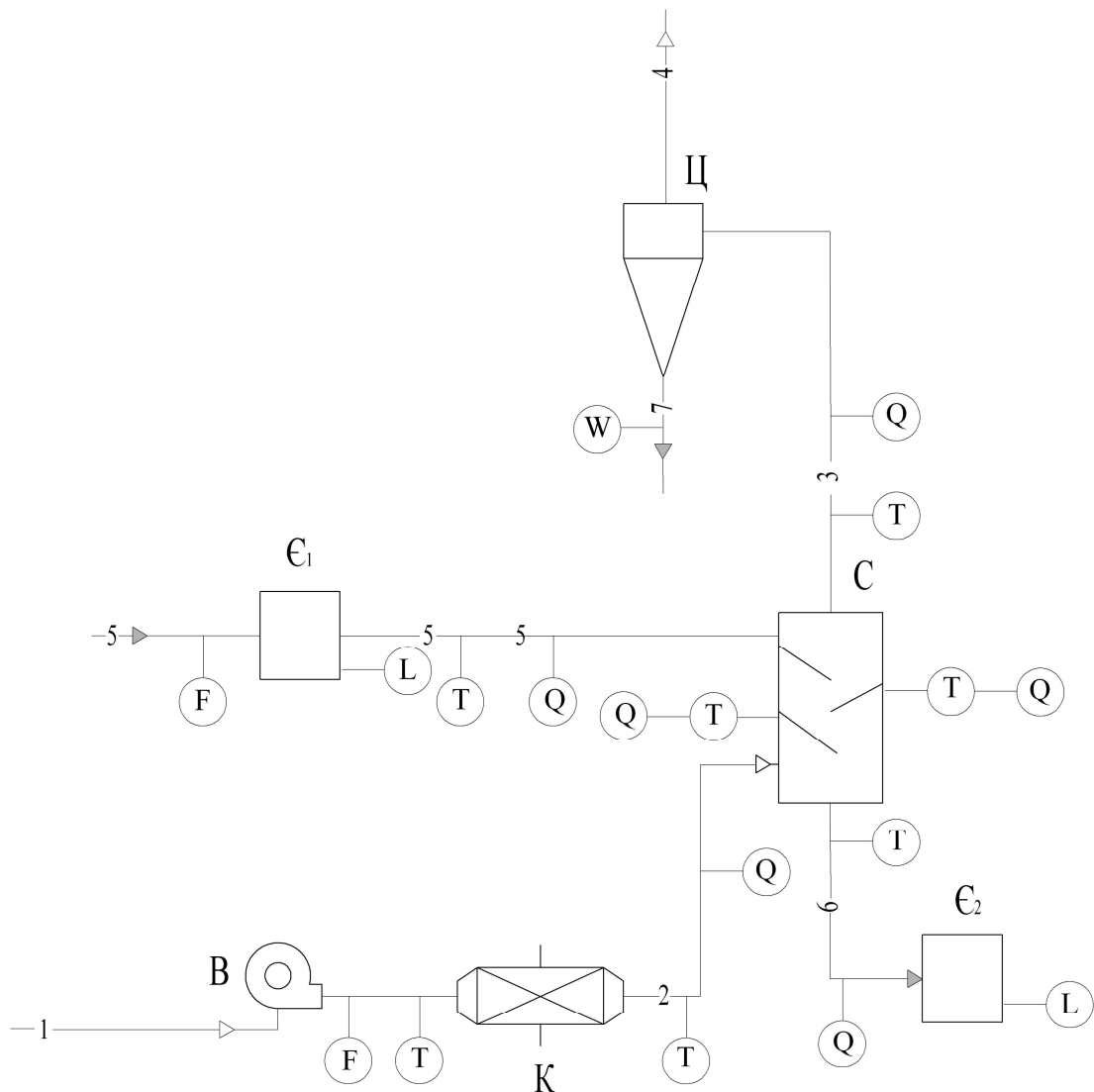


Рисунок 2.4 – Контрольовані параметри експериментального стенда:

F – витрата потоків; T – температура потоків; Q – вологовміст в потоках; W – маса потоку; L – рівень дисперсного матеріалу

Витрата повітря контролюється за допомогою камерної діафрагми ДКС 0,6–65 в якості первинного приладу, вимірювального перетворювача перепаду тиску та аналогового приладу. Зміна витрати повітря здійснюється за допомогою шиберної засувки, що розміщена після вентилятору.

Витрата дисперсного матеріалу контролюється за допомогою витратоміра сипких матеріалів. Зміна витрати дисперсного матеріалу здійснюється за допомогою пристрою для дозування, що розміщений на трубопроводі дисперсного матеріалу.

Температура повітря, яке надходить до калорифера, після калорифера, в об'ємі

поличної сушарки та після неї контролювалася та реєструвалася за допомогою набору приладів термоперетворювач опору – перетворювач вимірювальний – цифровий прилад.

Температура дисперсного матеріалу на полицях сушарки контролювалася за допомогою мультиметра.

Відносна вологість повітря на вході в поличну сушарку, в апараті та на виході з нього реєструвалася за допомогою психрометра.

Вологість дисперсного матеріалу контролюється за допомогою дієлькометричних вимірювачів вологості.

Прилади контролю та регулювання, які використовувались під час проведення експерименту, пройшли відповідні випробування згідно з методиками [94, 95]. Експериментальний стенд обладнано пультом управління пускорегулювального обладнання. Методика проведення замірів та опис замірів спираються на рекомендації [95].

2.4.2 Контроль та вимірювання гідродинамічних характеристик

Серію досліджень гідродинамічних характеристик потоків здійснено на модельній установці поличної сушарки (рисунок 2.3, а) в складі експериментальної установки конвективного сушіння (рисунки 2.1, 2.2).

Порядок проведення експерименту:

- дослідження гідродинаміки газового потоку;
- дослідження двофазної системи «газовий потік – тверді частинки» з визначенням режимів роботи поличної сушарки та опору зваженого шару.

Газодинамічний опір повного газового потоку, опір складових газового потоку, опір зваженого шару, повний та статичний тиск до та після контактної ступені зокрема і всього апарата взагалі – основні характеристики, що необхідно отримати для всебічного аналізу гідродинаміки робочого простору поличної сушарки. 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) 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 ста-

новити не більше ± 1 мм спиртового стовпчика. Тарування трубок Піто-Прандтля проведено на спеціальному аеродинамічному стенді.

Динамічний тиск (швидкісний напір) $P_{дин}$, Па, обчислюється таким чином [94]:

$$P_{дин} = P - P_{ст}, \quad (2.1)$$

де $P_{ст}$ – статичний тиск.

Швидкість руху газового потоку по газопроводах W_2 [94]

$$W_2 = \sqrt{\frac{2(P - P_{ст})}{\rho_2}}, \quad (2.2)$$

де $\rho_2 = 1,29$ кг/м³ при $T = 293$ К, $P = 101,3 \cdot 10^3$ Па.

Витрата газу (повітря) V на модельній установці

$$V = W_2 f_{2н}, \quad (2.3)$$

де $f_{2н}$ – площа поперечного перерізу газопроводу в точці вимірювання.

Характер розподілу складових повної швидкості руху газового потоку в робочому просторі поличної сушарки досліджувався за допомогою кульового 5-канального аеродинамічного зонда. Для цього в конструкції корпусу 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 демпфірувальні вставки в гумові шланги. Градування зонда виконано еталонною трубкою Прандтля в аеродинамічній трубці зі строгою орієнтацією потоку в просторі.

Вимірювання гідродинамічних характеристик газового потоку відбувалося за допомогою кульового 5-канального аеродинамічного зонда. 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 W_2 і тиску P в точці заміру [94]:

$$\delta = f(K_\delta), \quad (2.4)$$

$$K_\delta = \frac{K_3 - K_1}{K_2 - K_4} = \frac{h_3 - h_1}{h_2 - h_4}, \quad (2.5)$$

$$W_2 = \sqrt{\frac{2\rho_p (h_2 - h_4)}{\rho_2 (K_2 - K_4)}}, \quad (2.6)$$

$$P = P_{ст} - P_{атм} = \rho_p \left(h_2 - K_2 \frac{h_2 - h_4}{K_2 - K_4} \right), \quad (2.7)$$

де $P_{атм}$ – атмосферний тиск; ρ_p – густина рідини в мікроманометрі (C_2H_5OH , $\rho_p = 790 \text{ кг/м}^3$ за умов проведення експериментальних досліджень у лабораторних умовах $T = 293 \text{ К}$, $P = 101,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$), кг/м^3 ; h_i – висоти стовпчиків рідини у трубках

відповідних мікроманометрів, m ; 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 $K_i = f(\delta)$.

При значних кутах δ для визначення швидкості W_r можливе за таким виразом [94]:

$$W_z = \sqrt{\frac{2\rho_p(h_3 - h_1)}{\rho_z(K_3 - K_1)}}. \quad (2.8)$$

За наявності розходжень значень, розрахованих за залежностями (2.6) та (2.8), при умові похибки 2–3 %, швидкість потрібно розраховувати як середньоарифметичну отриманих вищезазначених залежностей.

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

2.4.3 Контроль та вимірювання температурно-вологісних характеристик

Серія експериментальних досліджень присвячена визначенню ефективності процесу сушіння залежно від конструктивних параметрів поличної сушарки, характеристик сушильного агента та способу організації руху потоку сушильного агента.

Для вимірювання вологості застосовувався діелькометричний вологомір типу ИВДМ-2С. Діелькометричний метод вимірювання вологості заснований на залежності діелектричної проникності матеріалу від його вологості (діелектрична проникність води у багато разів вище, ніж у більшості матеріалів, здатних поглинати вологу, тому діелектрична проникність вологого матеріалу дає достовірну інформацію про його вологість). За цим методом вимірюють ємність датчика, заповненого досліджуванним матеріалом. Вимірювана ємність є функцією діелектричної проникності, і, відповідно, вологості контрольованого матеріалу. До переваг діелькометричних вимірювачів вологості слід віднести контроль вологості в широкому діапазоні з високою точністю, оперативність вимірів, відсутність пошкоджень на вимірюваній поверхні після вимірювань.

За результатами всіх вимірювань обчислюють середнє арифметичне значення показань вологоміра.

За градуовальної характеристики для даного матеріалу визначають середнє значення його вологості, відповідне значенню показань вологоміра.

Абсолютну похибку визначення середньої вологості проконтрольованого матеріалу у відсотках обчислюють за формулою:

$$\tilde{\Delta}[U] = \pm \sqrt{\frac{\tilde{\Delta}_{oc}^2[U]}{3} + \frac{\tilde{\sigma}^2\left[\overset{\circ}{\Delta}(U)\right]}{3} + \Delta_r^2}, \quad (2.9)$$

де $\tilde{\Delta}_{oc}[U]$ і $\tilde{\sigma}\left[\overset{\circ}{\Delta}(U)\right]$ – систематична і випадкова складові основної абсолютної похибки вологоміра, значення яких наведено в технічній документації на вологомір; Δ_r – абсолютна похибка градуювання.

Для вимірювання температури газодисперсного потоку застосовувався мультиметр типу DT-838. Принцип дії мультиметра заснований на ефекті Зеєбека або, інакше, термоелектричному ефекті. Коли кінці провідника знаходяться при різних температурах, між ними виникає різниця потенціалів, пропорційна різниці температур. Коефіцієнт пропорційності називають коефіцієнтом термоЕРС. У різних металів коефіцієнт термоЕРС різний і, відповідно, різниця потенціалів, що виникає між кінцями різних провідників, буде різна.

2.5 Методика обробки результатів експериментальних досліджень. Оцінювання впливу похибок вимірів на результати досліджень

Визначення похибки вимірів та результатів розрахунку основних гідродинамічних характеристик взаємодіючих потоків у робочій зоні експериментального зразка поличної сушарки базується на загальноприйнятих методиках та рекомендаціях [96, 97] 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 [98, 99].

У ході проведення експерименту можливе виникнення помилок двох родів – випадкової та систематичної [97].

Випадкова помилка зменшує точність результатів експерименту. Аналіз такого роду помилки можливий за умов використання середньоквадратичного відхилення σ , що обчислюється за такою формулою [97]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}, \quad (2.10)$$

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

Найбільша можлива похибка окремого виміру визначається за правилом трьох сигм [97, 100]

$$\Delta = 3\sigma. \quad (2.11)$$

Двосторонній довірчий інтервал середнього арифметичного значення \mathcal{E} визначали за залежністю [97] за умови ймовірності його потрапляння в довірчий інтервал 95 % :

$$\varepsilon = t_p \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2.12)$$

де t_p – критерій Стьюдента [97, 98].

Середньоквадратична похибка непрямих вимірів [98]:

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x} \cdot \Delta \cdot x_i \right)^2}, \quad (2.13)$$

де $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Точність отриманих рівнянь регресії визначена за методикою найменших квадратів [97].

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. Усі прилади пройшли перевірку шляхом порівняння їх точностних характеристик із заявленими в технічній документації. Зв'язок приладів вимірювання з приладами на щиті контролю забезпечено з максимальною похибкою обробки сигналів у межах 1,5 %.

2.6 Висновки до другого розділу

1. Математичне моделювання гідродинаміки руху потоків здійснювалося на базі класичних положень механіки рідини та газу і технічної гідромеханіки.

2. Математичне моделювання кінетики сушіння здійснювалося на базі положень динаміки зневоднення при конвективному сушінні.

3. Побудову теоретичних залежностей виконано диференціальними методами математичного аналізу та інтегрального обчислення. Для зіставлення результатів теоретичних та експериментальних досліджень з результатами комп'ютерного моделювання застосовано системи тривимірного твердотілого моделювання та розрахунку гідродинаміки руху потоків чисельними методами.

4. Розроблено експериментальну установку для проведення досліджень.

5. Розроблено та обґрунтовано методики експериментального дослідження технологічних параметрів процесу, гідродинамічних та температурно-вологісних характеристик.

6. Представлено методику обробки результатів досліджень та оцінювання адекватності запропонованої математичної моделі.

Основні положення розділу опубліковані в [93].

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНИЙ ОПИС ГІДРОДИНАМІКИ ПОТОКІВ ТА ІНТЕНСИВНОСТІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ У БАГАТОСТУПЕНЕВИХ ПОЛИЧНИХ АПАРАТАХ

3.1 Фізична модель гідродинаміки руху потоків та процесу сушіння дисперсних матеріалів у поличній сушарці

Наявність похилих перфорованих полиць у робочому просторі поличної сушарки призводить до зменшення його площі вільного поперечного перерізу. Це конструктивне рішення стає причиною місцевого збільшення швидкості і ступеню турбулізації потоку сушильного агента, а також зміни характеру розподілення швидкостей навколо полиці [13].

При певних швидкостях потоку сушильного агента (значно менших за першу критичну швидкість) матеріал, який безперервно подається у сушарку, рухається по поверхні похилої перфорованої полиці у вигляді «швидкого» шару, що проскакує вздовж неї. Такий рух частинок зумовлений тим, що на виході з живильного пристрою (дозатора), вони ще мають достатню інерцію. При збільшенні витрат сушильного агента порізність «швидкого» шару наближається до максимальної, його структура стає зваженим шаром з властивим йому процесом винесенням тонкодисперсних фракцій. Частинки матеріалу після проходження вздовж похилої перфорованої полиці починають поступово гальмуватись по мірі наближення до стінок сушарки у розвантажувальному просторі, накопичуючись біля поверхні стінок. Утворений шар дисперсної фази продувається висхідним потоком сушильного агента; при цьому маса шару поступово збільшується за рахунок надходження нових частинок дисперсної фази. Цей процес триває до моменту порушення балансу сили тяжіння частинки і аеродинамічної сили її взаємодії з висхідним потоком. При накопиченні «критичної» маси дисперсної фази та порушенні балансу сил, частина матеріалу виводиться зі ступеня через розвантажувальний простір. При описаному характері просування матеріала по поверхні похилої полиці та у розвантажувальному просторі аеродина-

мічні сили висхідного потоку лише в тій чи іншій мірі стримують рух твердих частинок і основна їх маса рухається у вигляді тонкого шару під дією сил тяжіння. Такий характер руху має назву «гравітаційно падаючого шару».

Таким чином, для режиму «гравітаційно падаючого шару» характерно мінімально необхідний час контакту частинок з сушильним агентом, що обумовлюється достатньо значною швидкістю руху частинок. Тому процес сушіння в даному режимі на поверхні полиці лімітується не гідродинамічними умовами, а довжиною полиці, по поверхні якої частинки рухаються достатньо швидко з мінімальним часом перебування. Останній дещо збільшиться в зоні накопичення частинок у вигляді шару на стінці апарата, у результаті чого маємо більш ефективний контакт фаз і, відповідно, більш інтенсивне вологовідведення від частинок сушильним агентом саме у цій зоні. Для режиму «гравітаційно падаючого шару», який реалізований на верхній (за напрямком руху потоку матеріалу) полиці, відбувається прогрівання частинок матеріалу. Таким чином, процес на верхній полиці, який реалізується в межах малого проміжку часу, відповідає періоду нагрівання матеріалу з незначним видаленням поверхневої вологи зі збільшенням швидкості сушіння [101, 102]. При цьому також спостерігається початок переміщення вологи із внутрішнього шару до поверхні частинок [103, 104]. Зазвичай період нагрівання незначний в порівнянні з іншими періодами сушіння [105, 106] і, якщо час перебування частинок на одній полиці менше ніж кінетично необхідний час нагрівання, то у верхній частині сушарки повинно бути декілька полиць, які працюють в режимі «гравітаційно падаючого шару».

Зростання швидкості сушильного агента спричиняє посилення його аеродинамічної дії на шар матеріалу, створюються умови для режиму зваженого шару на поверхні перфорованої полиці і біля стінки апарата у зоні розвантажувального зазору. При виході сушильного агента з розвантажувального зазору у вигляді струменю утворюється область підвищеного тиску. Частина кінетичної енергії рухомого потоку сушильного агента витрачається на компенсацію сили тертя, яка призводить до його гальмування. Дисперсна фаза, яка рухається у цій зоні і характеризується невеликим запасом кінетичної енергій, переходить у зважений шар. Дрібна фаза, яка має силу інерції під час розвантаження з поверхні похилої полиці, недостатню для ком-

пенсації кінетичної енергії повітряного потоку, повторює траєкторію струменю сушильного агента, який виходить з розвантажувального простору, підхоплюється ним і рухається в зону сепарації до патрубку виходу сушильного агента з апарата. Полідисперсна система в сепараційній зоні поділяється на дві фракції: частинки більшого розміру, швидкість витання яких більша від швидкості повітряного потоку у перерізі цієї частини апарата, переміщуються вниз на поверхню полиці, а частинки меншого розміру – виносяться з апарата повітряним потоком.

У режимі зваженого шару ефективність видалення вологи із матеріалу значно збільшується за рахунок інтенсифікації контакту фаз, оскільки частинки активно взаємодіють з повітряним потоком як на поверхні перфорованої полиці, так і в зоні розвантажувального простору. Оскільки при зменшенні величини зазору між кінцем полиці та стінкою апарата підвищується швидкість повітряного струменю, який входить у зважений шар матеріалу через розвантажувальний простір, то це є основним фактором інтенсифікації контакту фаз і, відповідно, процесу масообміну. Також збільшенню вологовіддачі від частинок матеріалу в режимі зваженого шару сприяє збільшення часу перебування частинок за рахунок їх масової циркуляції в зоні над розвантажувальним простором. Тому, враховуючи гідродинамічні особливості зваженого шару, в даному режимі достатньо ефективно проводиться сушіння вологого матеріалу в періодах постійної (перший період) та падаючої швидкості (другий період) [107, 108].

При установці похилої полиці з величиною зазору, який складає $1/3$ довжини апарата, для зваженого шару характерно не щільне упакування частинок з порізністю шару в межах $0,65 < \epsilon < 0,8$. Тому поверхні частинок в такому шарі омиваються повітряним потоком вільно і рівномірно, що сприяє достатньо інтенсивному видаленню незв'язаної вологи з поверхні частинок (перший період).

При установці похилої полиці з величиною зазору, який коливається від $1/10$ до $1/3$ довжини апарата, зважений шар матеріалу має порізність $0,6 < \epsilon < 0,7$, що характерно й для киплячого шару [109]. В такому шарі за рахунок активного переміщення частинок здійснюється, окрім турбулізації газового потоку довкола частинок, і підвищення часу перебування частинок у шарі. Це сприяє ефективному видаленню

зв'язаної вологи з внутрішніх шарів частинок (другий період). Причому у початковий період падаючої швидкості видаляється волога мікрокапілярів частинок, а починаючи з другої критичної точки на лінії падаючої швидкості видаляється адсорбційно зв'язана волога, на видалення якої треба затратити більше енергії [110, 111].

Оскільки кінетика сушіння у період падаючої швидкості характеризується найбільшою тривалістю у часі, то кількість полиць в нижній частині сушарки підбирається, виходячи із необхідного часу для повного видалення вологи відповідно технологічним вимогам.

Переміщення дисперсної фази на кожному з каскаду полиць якісно є однако-вим, але окремі зони її руху по перерізу сушарки залежно від висоти розташування полиці можуть мати різну довжину. По мірі переміщення по висоті сушарки сушильний агент дещо знижує свою швидкість внаслідок аеродинамічного опору по довжині та місцевих опорів. Зміна швидкості руху сушильного агента є не дуже значною, але все таки призводить до утворення різних режимів руху дисперсної фази. На верхній полиці каскаду спостерігається більш швидкий рух частинок по довжині полиці, з накопиченням меншої кількості матеріалу на стінках. По мірі наближення до місця введення сушильного агента швидкість руху частинок на полиці починає зменшуватись. Така картина може бути візуально не дуже помітною, але експериментальні дослідження дозволяють це стверджувати.

Завдяки змінам конструктивних параметрів полиць каскаду сушарки забезпечуються необхідні гідродинамічні умови руху матеріалу на кожній полиці каскаду. Зауважимо, що під час конструювання гравітаційної полиць сушарки слід забезпечити рівномірність контакту сушильного агента з дисперсним матеріалом на кожній полиці сушарки. Досягнення такої рівномірності дає можливість регулювання часу перебування частинок на полицях, враховуючи їх фізико-хімічні властивості. Будь-яка нерівномірність контакту сушильного агента з дисперсним матеріалом може призвести до недогріву (з недостатнім висушуванням) або до перегріванням з небажаним руйнуванням частинок та зниженням його споживчих якостей.

Таким чином, на верхній полиці шляхом варіювання довжини, кута встановлення або ступеня перфорації забезпечується мінімально необхідний час контакту

дисперсного матеріалу з визначеними фізико-хімічними властивостями, грануляційним складом та параметрами сушильного агента. На даній полиці відбувається і видалення дрібної фракції, тобто вона виконує роль сепаратора. На середній похилій контактній полиці, змінюючи її конструктивні параметри, збільшується час перебування дисперсного матеріалу і відповідно його контакт з сушильним агентом, що сприяє більш інтенсивному видаленню вологи. На нижній похилій контактній полиці при контакті дисперсного матеріалу з сушильним агентом забезпечується тривалий час перебування частинок на полиці для видалення вологи з глибини матеріалу.

3.2 Математична модель процесу сушіння дисперсних матеріалів у гравітаційних поличних апаратах

Для визначення гідродинамічних та кінетичних параметрів процесу сушіння дисперсних матеріалів в гравітаційних поличних апаратах математична модель передбачає розроблення окремих елементів (рівнів). Кожен наступний рівень математичної моделі є узагальнюючим по відношенню до попереднього та враховує одержані в ньому параметри. Така ієрархічна структура дозволяє провести аналіз процесу сушіння від елементарного об'єму апарата до поступеневого, враховуючи зміни гідродинамічних і кінетичних параметрів, щоб в кінцевому результаті отримати кількісну та якісну характеристику процесів, що відбуваються у всьому об'ємі апарата [30, 112].

На першому рівні математичної моделі визначається інтенсивність передачі тепла від сушильного агента до поверхні дисперсного матеріалу за результатами опису кінетики його нагрівання. При цьому визначається необхідний час сушіння дисперсного матеріалу до визначеної вологості.

На другому рівні математичної моделі проводиться опис гідродинаміки процесу сушіння, визначається поле швидкостей газового потоку та дисперсного матеріалу на кожному зі ступенів гравітаційної поличної сушарки, час перебування частинок в апараті та здійснюється зіставлення значень часу перебування частинки та часу її сушіння з першого рівня.

На третьому рівні математичної моделі проводиться рекурентний розрахунок процесу видалення вологи з матеріалу в об'ємі всього апарата, визначається ефективність кожного зі ступенів гравітаційної поличної сушарки залежно від необхідного часу перебування та інтенсивності зневоднення; визначаються оптимальні конструктивні параметри сушарки (кількість ступенів, кут нахилу та довжина полиць) залежно від початкових характеристик сушильного агента та дисперсного матеріалу. Дані з двох попередніх рівнів математичної моделі (час і температура нагрівання матеріалу, гідродинамічні характеристики сушильного агента і дисперсного матеріалу) є вихідними для визначення максимальної ефективності кожного зі ступенів сушіння в межах поличного апарата [113, 114].

3.2.1 Нагрівання та зневоднення дисперсного матеріалу в процесі сушіння

При розгляді кінетики процесу сушіння одиночної сферичної частинки на першому рівні розглядається процес міжфазного теплообміну між її поверхнею та потоком сушильного агента, а також перенесення тепла всередині неї.

У випадку, коли характер теплопровідності всередині частинки впливає на кінетику видалення вологи, розрахунок проводиться на основі рівнянь внутрішнього тепломасоперенесення [115]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t_m}{\partial \tau} &= a_m \left[\frac{\partial^2 t_m}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t_m}{\partial r} \right] + \frac{\varepsilon^* r_c}{c_u} \frac{\partial U_m}{\partial \tau} \\ \frac{\partial U_m}{\partial \tau} &= k \left[\frac{\partial^2 U_m}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial U_m}{\partial r} \right] + k \sigma^* \left(\frac{\partial^2 t_m}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t_m}{\partial r} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (3.1)$$

де t_m – температура матеріалу; U_m – відносна вологість матеріалу; ε^* – критерій фазового перетворення; σ^* – термоградієнтний коефіцієнт перенесення вологи; a_m – коефіцієнт температуропровідності; r_c – питома теплота фазового переходу; r – поточний радіус частинки; c_u – теплоємність частинки; k – коефіцієнт потенціалопровідності.

Розрахунок процесу сушіння за рівнянням масоперенесення має деякі особливості, пов'язані з тим, що в об'єктах сушіння відбувається взаємопов'язане тепломасоперенесення: видалення вологи і одночасне нагрівання вологого матеріалу.

Взаємозв'язок між цими процесами обумовлений тим, що масообмінні коефіцієнти залежать від температури, а теплові – від концентрації вологи в матеріалі [116].

З урахуванням того, що матеріал, на кожному ступені висушується в обмеженому діапазоні вологості і є термолабільним, доцільно припустити також аналогію градієнтних механізмів тепло- та масоперенесення. Тоді система рівнянь (3.1) запишеться таким чином [117, 118]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t_m}{\partial \tau} &= a_m \left[\frac{\partial^2 t_m}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t_m}{\partial r} \right] \\ \frac{\partial U_m}{\partial \tau} &= k \left[\frac{\partial^2 U_m}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial U_m}{\partial r} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Використання для розрахунку кінетики сушіння одного з рівнянь системи (3.2), як один з методів опису, запропонований автором [119], дає можливість замінити друге рівняння емпіричною апроксимацією. Таким чином, температурно-вологісна характеристика матеріалу замикає систему рівнянь тепломасоперенесення. Щоб провести розрахунок процесу сушіння по концентраційним зонам, в цьому випадку потрібно знати теплофізичні властивості дисперсного матеріалу, а для визначення коефіцієнта масовіддачі і масопровідних властивостей використовують аналогічну температурно-вологісну апроксимацію.

В даний час існує велика кількість теоретичних рішень диференціальних рівнянь тепломасоперенесення для дисперсних систем, які піддаються сушінню [14,25,120]. Всі вони з більшою або меншою точністю описують процес нагрівання частинок при заданих початкових та крайових умовах третього роду в рівняннях (3.2).

Розглянемо одну з найбільш розповсюджених експоненціальних моделей [13,115] у вигляді зміни температури та вологості частинки в залежності від її поточного радіусу та часу сушіння:

$$\frac{t_{(r,\tau)} - t_{m.poch}}{t_{суш.poch} - t_{m.poch}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin \mu_n \frac{r}{R}}{\mu_n \frac{r}{R}} \exp(-\mu_n^2 Fo_t), \quad (3.3)$$

$$\frac{U_{м.поч} - U_{(r,\tau)}}{U_{м.поч} - U_{суш.поч}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin \mu_n \frac{r}{R}}{\mu_n \frac{r}{R}} \exp(-\mu_n^2 Fo_u), \quad (3.4)$$

де $t_{(r,\tau)}$ – температура частинки в поточному її радіусі в даний момент часу; $t_{м.поч}$ – початкова температура частинки, яку піддають сушінню; $t_{суш.поч}$ – початкова температура сушильного агента, °С; $U_{м.поч}$ – початкова вологість частинки, яку піддають сушінню; $U_{(r,\tau)}$ – вологість частинки в поточному її радіусі в даний момент часу; $U_{суш.поч}$ – початкова вологість сушильного агента; R – характерний розмір дисперсного матеріалу; Fo_t – критерій Фур'є для теплообміну під час сушіння; Fo_u – критерій Фур'є для масообміну під час сушіння; A_n, μ_n – сталі коефіцієнти та корені характеристичного рівняння, значення яких знаходяться з відповідних таблиць [115].

Корінь характеристичних рівнянь (3.3 – 3.4) μ_n є функцією критерію Біо

$$\mu_n = f(Bi), \quad (3.5)$$

який визначається за таким виразом:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda}, \quad (3.6)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі; λ – коефіцієнт теплопровідності.

При розгляді вказаної функціональної залежності приймають до уваги особливості процесу теплообміну, які визначаються граничними значеннями критерію Біо:

$$0 < Bi < \infty. \quad (3.7)$$

При $Bi \rightarrow 0$ дисперсний матеріал малого розміру буде мати максимальне значення теплопровідності, а при $Bi = \infty$ матеріал максимального розміру буде мати ма-

ксимальне значення коефіцієнту тепловіддачі. Виходячи з граничних значень критерію Біо для процесу сушіння є необхідність використання його у вказаних межах з метою подальшого визначення кореня характеристичного рівняння (3.3) μ_n .

Коефіцієнт тепловіддачі α для визначення критерію Біо отримується з експериментальних даних, отриманих авторами [13]. В залежності від визначеного критерію Біо визначається корінь рівнянь (3.3 – 3.4) μ_n по графіку [121].

Слід зауважити, що рішення (3.3 – 3.4) у вигляді ряду знаходиться достатньо швидко [122]. Розпочинаючи з деякого значення критерію Фур'є прийнятна в інженерній практиці точність розрахунку 1–2 % може бути досягнута вже завдяки першим двом-трьом членам ряду. При цьому вклад першого члену ряду становить не менше 96 %, тобто похибка не перевищуватиме 3–4 % і тому обмежимося лише ним. Таким чином, враховуючи умови

$$\left. \begin{array}{l} r = R, \\ Fo \geq 0,7 \end{array} \right\} \quad (3.8)$$

З рівняння (3.3) кінетика нагрівання частинки визначається експоненційною функцією:

$$\frac{t_{нов} - t_{м.поч}}{t_{суш.поч} - t_{м.поч}} = 1 - A_n \cdot \frac{\sin \mu_n}{\mu_n} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_t), \quad (3.9)$$

де $t_{нов}$ – температура поверхні частинки (зерна);

З урахуванням значення критерію Фур'є запишемо рівняння (3.9) в такому вигляді:

$$\frac{t_{нов} - t_{м.поч}}{t_{суш.поч} - t_{м.поч}} = 1 - A_n \cdot \frac{\sin \mu_n}{\mu_n} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot \frac{a_m \cdot \tau_n}{R^2}), \quad (3.10)$$

де τ_n – час нагріву.

Експоненційний характер зміни температури поверхні дисперсної частинки згідно рівняння (3.10) показано на графіках (рисунок 3.1).

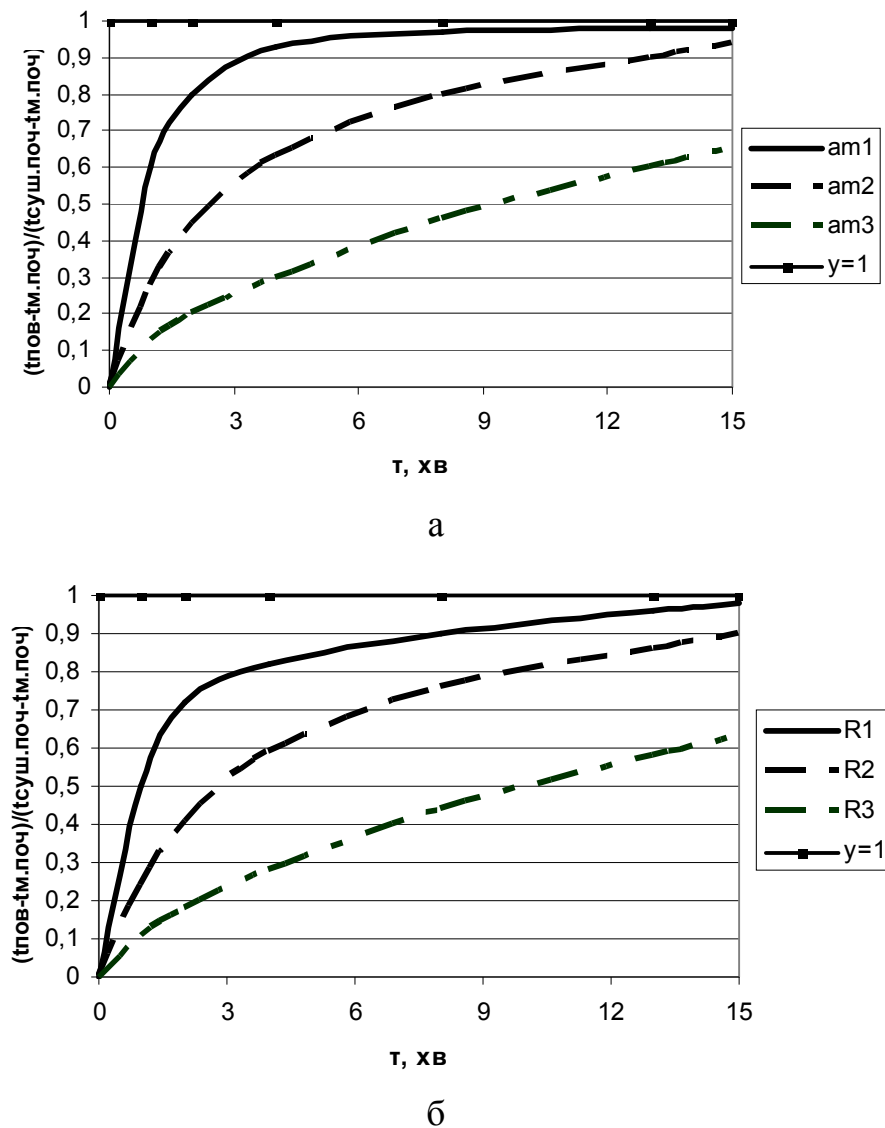


Рисунок 3.1 – Якісний характер кривих інтенсивності нагрівання матеріалу:
 а – при $R = \text{const}$ в залежності від їх теплофізичних властивостей ($a_{m1} > a_{m2} > a_{m3}$);
 б – при $a_m = \text{const}$ в залежності від їх теплофізичних властивостей ($R_1 < R_2 < R_3$).

Аналіз рисунка 3.1 показує, що при постійному радіусі частинки матеріал може нагріватись з різною інтенсивністю, яка залежить від його теплофізичних властивостей. Відповідно, нагрівання частинок з подібними теплофізичними властивостями відбувається інтенсивніше при зменшенні їх радіусу.

У зваженому шарі твердих частинок, враховуючи активне перемішування частинок в шарі, кінетика процесу сушіння описується балансовими рівняннями

перенесення теплоти та вологи:

$$\begin{cases} G_g \cdot c_q \cdot \rho_q \frac{dt_m}{d\tau} = \alpha \cdot F_{ш} (t_{суш} - t_m) \\ \rho_q \frac{dU_m}{d\tau} = \beta \cdot F_{ш} (U_m - U_{суш}) \end{cases}, \quad (3.11)$$

де G_g – витратна концентрація (як відношення масових витрат твердої та газової фаз); U_m – поточна вологість матеріалу; t_m – поточна температура матеріалу; $t_{суш}$ – поточна температура сушильного агента; β – коефіцієнт масовіддачі; $F_{ш}$ – питома поверхня частинок в шарі $F_{ш} = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_q}$; τ_c – час сушіння матеріалу.

Після інтегрування рівняння (3.11), отримаємо:

$$\begin{cases} \frac{t_{суш.поч} - t_m}{t_{суш.поч} - t_{м.поч}} = \exp\left(-\frac{\alpha \cdot F_{ш}}{G_g \cdot c_q \cdot \rho_q} \cdot \tau_n\right) \\ \frac{U_m - U_{суш.поч}}{U_{м.поч} - U_{суш.поч}} = \exp\left(-\frac{\beta \cdot F_{ш}}{\rho_q} \cdot \tau_c\right) \end{cases}. \quad (3.12)$$

Для визначення кінетичних характеристик вказаних експоненційних кривих процесу, слід провести процедуру лінеаризації. Так, з рівнянь (3.12) видно, що швидкість нагрівання матеріалу з характерним розміром частинок d_q складає деякий параметр K_t :

$$K_t = \frac{\alpha}{G_g \cdot c_q \cdot \rho_q} \cdot \frac{6(1-\varepsilon)}{d_q}. \quad (3.13)$$

Тоді перше рівняння системи (3.12) з урахуванням заміни відповідних параметрів у лівій частині даного рівняння запишеться у вигляді

$$\frac{t_{суш.поч} - t_m}{t_{суш.поч} - t_{м.поч}} = \exp(-K_t \tau_n). \quad (3.14)$$

або після логарифмування

$$K_t \tau_n = -\ln \frac{t_m - t_{m.pоч}}{t_{суш.поч} - t_{m.pоч}}. \quad (3.15)$$

Таким чином, після лінеаризації модель кінетики нагрівання набуває вигляду, зручного для статистичної обробки даних і визначення кінетичних параметрів (рисунки 3.2 а). Дані для побудови нижченаведеної графічної залежності представлені в додатку А (таблиця А1).

З цього графіка кінетичний параметр K_t знаходиться як тангенс кута нахилу прямої, що апроксимує сукупність експериментальних точок в координатах часу та безрозмірної температури.

Для визначення часу сушіння дисперсної частинки, доцільно дослідити зміну вологості матеріалу згідно аналогічного рішення (3.14) при відповідній заміні температур на вологості.

Лінеаризований графік кінетики сушіння в координатах часу та вологості матиме вигляд (рисунки 3.2 б). Дані для побудови нижченаведеної графічної залежності представлені в додатку А (таблиця А2).

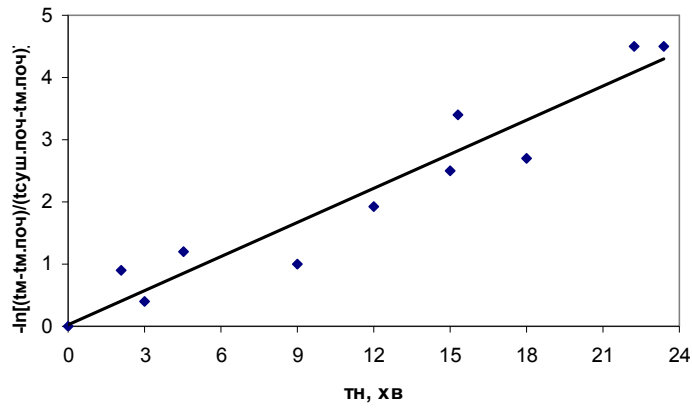
Згідно відомої аналогії тепло- та масообмінних процесів рівняння лінійної апроксимації зміни вологості аналогічне (3.15), запишеться таким чином:

$$K_u \tau_c = -\ln \frac{U_m - U_{суш.поч}}{U_{m.pоч} - U_{суш.поч}}, \quad (3.16)$$

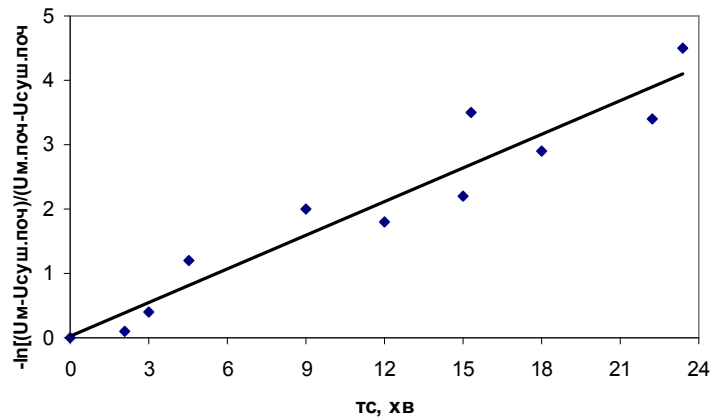
де $K_u = \frac{\beta \cdot F_{ш}}{\rho_q}$ – кінетичний параметр вологовіддачі.

Задаючись початковою вологістю матеріалу, сушильного агента та потрібною технологічною вологістю матеріалу розраховується час сушіння:

$$\tau_c = -\frac{1}{K_u} \ln \frac{U_m - U_{суш.поч}}{U_{m.pоч} - U_{суш.поч}}. \quad (3.17)$$



а



б

Рисунок 3.2 – Графік до визначення кінетичного параметру: а – для нагрівання матеріалу (K_t); б – для сушіння матеріалу (K_u)

3.2.2 Гідродинаміка газового потоку та шару дисперсного матеріалу в в гравітаційній поличній сушарці

Рух взаємодіючих потоків на ділянці між перерізами А та В двох суміжних ступенів сушарки, які працюють в усталеному режимі, можна описати деякою сукупністю усереднених ліній току. При цьому потік сушильного агента, що рухається назустріч дисперсному матеріалу, в турбулентному режимі утворює систему вихорів різної локалізації та масштабу, які підтримують зважений шар зі змінною локальною концентрацією дисперсних частинок і аеродинамічним опором. Очевидно, що при відсутності перфорації полиці траєкторії руху частинок та лінії току повітря будуть найдовшими і, в залежності від довжини полиці та зазору пересипання, будуть оцінюватись, в середньому, подвійною довжиною полиці (рисунок 3.3, а). При наявності

ті перфорації довжина найкоротшої траєкторії дорівнюватиме відстані між перерізами А та В (рисунок 3.3, б). При цьому слід звернути увагу, що сумарні втрати енергії сушильного агента вздовж будь-якої лінії току між вказаними перерізами будуть однаковими.

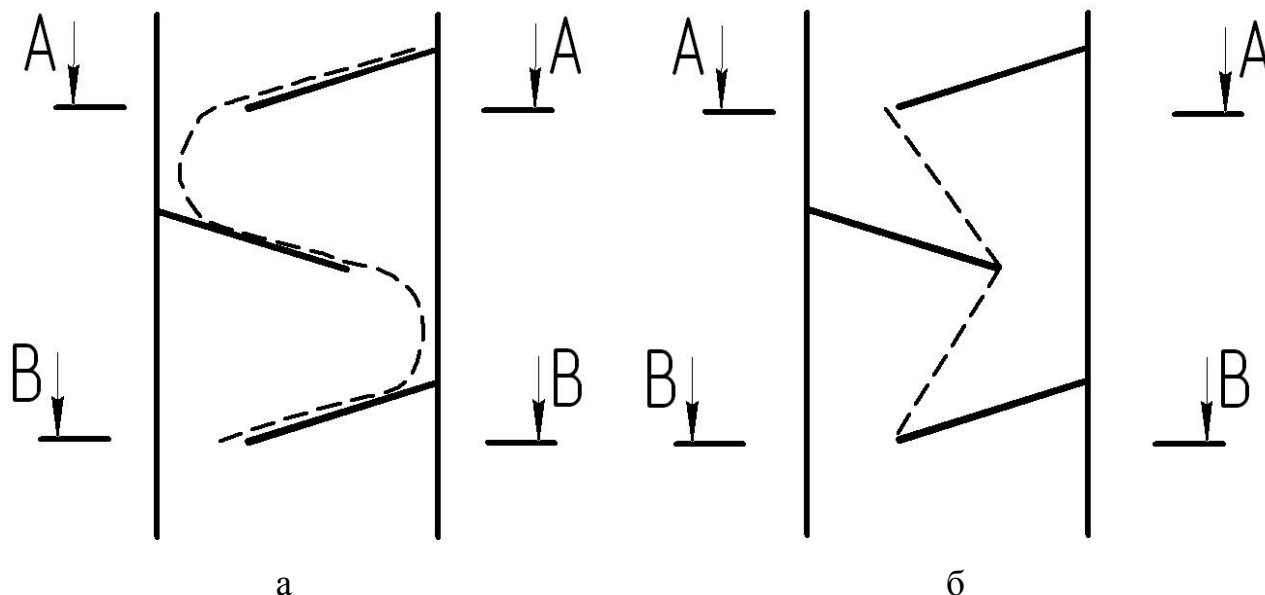


Рисунок 3.3 – Траєкторії руху частинок: а – найдовша; б – найкоротша

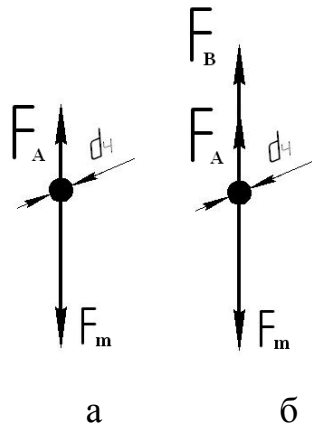
Рух частинок під дією висхідного газового потоку визначається на основі другого закону Ньютона:

$$m \left(\frac{dW_q}{d\tau} \right) = \sum F_i \quad (3.18)$$

Силовий аналіз руху частинки представлено на рисунку 3.4.

Результуючу силу, що діє на сферичну частинку діаметром d_{\pm} в нерухомому газовому середовищі можна визначити через різницю густини частинки ρ_q та двофазної системи «тверде-газ» $\rho_{\text{сум}}$, враховуючи її порізність ε :

$$F = F_m - F_a = \frac{\pi d_q^3}{6} (\rho_q - \rho_z) g = \frac{\pi d_q^3}{6\varepsilon} (\rho_q - \rho_{\text{сум}}) g \quad (3.19)$$



Аеродинамічна сила висхідного повітряного потоку знаходиться по формулі:

$$F_B = \zeta \frac{\rho_2 W_2^2}{2} \frac{\pi d_q^2}{4}. \quad (3.20)$$

При цьому коефіцієнт опору визначається аеродинамічним режимом згідно [123] залежно від критерію Re :

$$\zeta = \left. \begin{array}{l} \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{0,33}} - \text{при значенні} \\ 0,44 - \text{при значенні} \end{array} \right\} \begin{array}{l} Re < 1000; \\ Re \geq 1000. \end{array} \quad (3.21)$$

Рисунок 3.4 – Сили, що діють на частинку в сушарці: а – в нерухомому газовому середовищі; б – у висхідному газовому потоці: F_m – сила тяжіння, F_A – сила Архімеда, F_B – аеродинамічна сила повітряного потоку

Зважений режим сушіння частинок в системі «тверде-газ» виникає за умови, коли рівнодіюча сил тяжіння та Архімеда буде дорівнювати аеродинамічній силі висхідного повітряного потоку. Прирівнюючи (3.19) і (3.20), знаходимо швидкість газового потоку, яка підтримує частинку у зваженому стані:

$$W_{z1} = \sqrt{\frac{4d_q g (\rho_q - \rho_{сум})}{3 \cdot \varepsilon \cdot \zeta \cdot \rho_2}}, \quad (3.22)$$

Для визначення швидкості газового потоку, яка відповідає початку винесення частинок із апарата, можна використовувати як критеріальні рівняння типу $Re_g = f(Ar)$ відповідно для ламінарного, перехідного та турбулентного режимів [22] так і універсальну формулу Годеса для всіх режимів [124]:

$$Re_g = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}, \quad (3.23)$$

де Re_g – критерій Рейнольдса при швидкості винесення W_{z2} ; $Re_g = \frac{W_{z2} \cdot d \cdot \rho_2}{\mu_2}$;

Ar – критерій Архімеда, $Ar = \frac{d_u^3(\rho_u - \rho_s)\rho_s g}{\mu_s^2}$; μ_s – динамічний коефіцієнт в'язкості.

Розглянемо рух частинки в міжполицевому просторі. При швидкості повітря в порах $W_2 > W_{21}$ вона буде підтримуватись у зваженому стані до моменту досягнення значення $W_2 = W_{22}$, що спричинить її винесення. Якщо швидкість повітря $W_2 < W_{22}$, то ця різниця швидкостей $\Delta W_2 = W_{22} - W_2$ зумовить рух частинки зверху вниз. У разі $W_2 < W_{21}$ частинка буде рухатись у режимі гравітаційного падаючого шару з різким зниженням часу перебування на полиці. Враховуючи, що газовий потік передає до 95 % моменту кількості руху дисперсного матеріалу, вважатимемо, що різниця швидкостей руху частинки ΔW_u приблизно дорівнюватиме різниці швидкостей ΔW_2 ($W_u \approx W_2$; $\Delta W_u = W_{22} - W_u$). Значення швидкості W_2 знаходиться з формули (3.44).

Час руху частинки вздовж полиці з кутом нахилу $\gamma = 90^\circ$ та довжиною $L_{пол}$ на i -му ступені сушарки буде дорівнювати:

$$\tau_{inert}^{cm} = \frac{L_{пол}}{\Delta W_u} \approx \frac{L_{пол}}{\Delta W_2}. \quad (3.24)$$

У випадку, коли полиця встановлена під невеликим кутом (на практиці в межах $10-35^\circ$), швидкість ΔW_2 , що характеризує рух частинки зверху вниз, матиме реально одну скочуючу складову $\Delta W_2 \cdot \sin \gamma$, тому що нормальна сила тиску частинки на полицю i , відповідно, нормальні складові прискорення та швидкості $\Delta W_2 \cdot \cos \gamma$ будуть компенсовані нормальною реакцією полиці (рисунок 3.5).

Таким чином, час руху частинки τ_{inert}^{cm} вздовж полиці на i -му ступені можна визначити з рівняння:

$$\tau_{inert}^{cm} = \frac{L_{пол}}{\Delta W_2 \sin \gamma}, \quad (3.25)$$

що при $\gamma = 90^\circ$ спрощується до попереднього виразу (3.24).

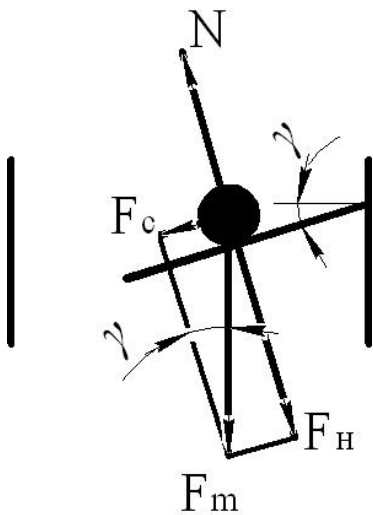


Рисунок 3.5 – Силевий аналіз руху дисперсного матеріалу по похилій контактній полиці:

F_c – сила скочування;
 F_n – нормальна сила тиску частинки на полицю;
 N – реакція полиці

Очевидно, що відношення часу руху частинки вздовж полиці обернено пропорційне синусам кута нахилу полиці:

$$\frac{\tau_{1nep}^{cm}}{\tau_{2nep}^{cm}} = \frac{\sin \gamma_2}{\sin \gamma_1} \quad (3.26)$$

З таких міркувань можна визначити можливість конструктивного впливу на час перебування частинки в міжполицевому просторі і регулювання процесу сушіння. Зменшуючи кут нахилу полиці, досягається збільшення часу перебування дисперсної частинки (терміну сушіння) на цьому ступені.

Результати обрахунку часу перебування окремої частинки на полиці за різних умов представлено на рисунку 3.6.

Формула (3.25) дозволяє визначити час перебування на полиці частинки, яка рухається незалежно від інших частинок, тобто розглядається її вільний рух. Такий вільний рух спостерігається тільки при малих об'ємних вмістах дисперсної фази в двофазній системі ($\delta < 0,1$), коли відстань між частинками така, що не відбувається ні зіткнень, ні взаємного впливу частинок. При $\delta \geq 0,1$ (стиснений рух частинки) поведінка системи змінюється: відстані між поверхнями частинок або розміри проходів між частинками стають менше їх діаметра, і частинка не може вільно проскакувати між двома іншими [125–128]. При цьому необхідно враховувати ефект зіткнень частинок між собою. Крім того, зіткнення частинок в двофазній системі може відбуватися також у тому випадку, коли дисперсна фаза складається з полідисперсних частинок або частинок з різною густиною [129].

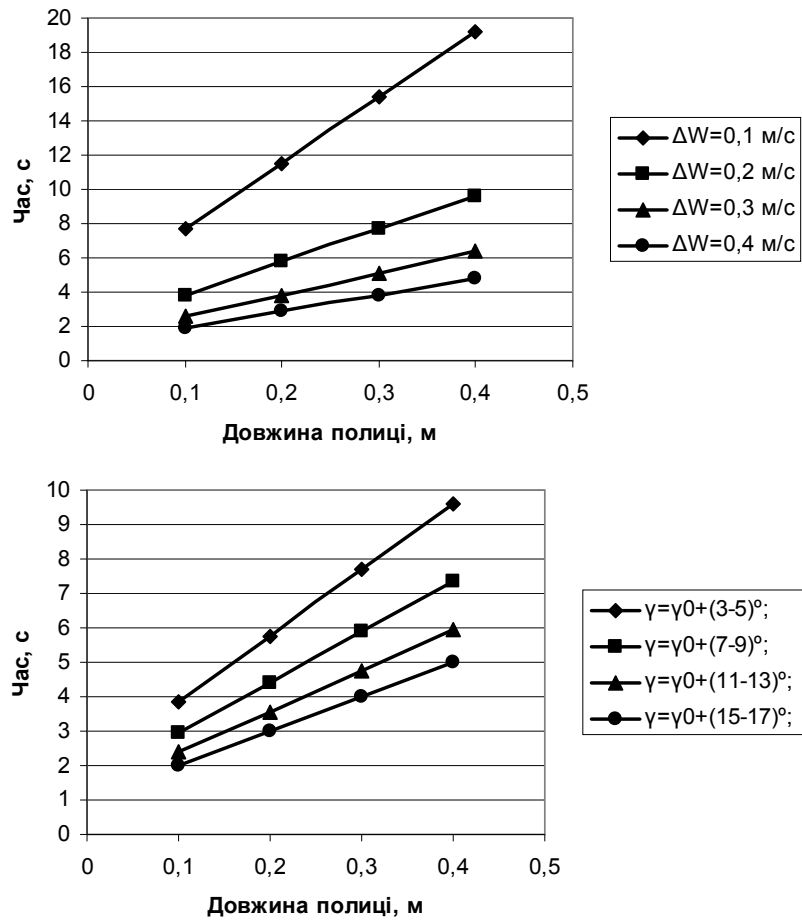


Рисунок 3.6 – Час перебування частинки на полиці (вільний рух)

Врахувати явище обмеженого руху частинки та сили міжфазної взаємодії представляється можливим при введенні коефіцієнта стисненості частинки χ .

Для визначення коефіцієнта стисненості частинок, виходячи з різних схем їх розташування частинки дисперсної фази, отримані різні формули [125, 130, 131]. Зокрема, схема при вільній засипці випадкового характеру враховується формулою [132]:

$$\chi = (1 - \delta)^{-m}, \quad (3.27)$$

де $\delta=0,6$ (випадок вільної засипки випадкового характеру [133]); $m=3-5$ [132].

Таким чином, вираз (3.25) набуде вигляду:

$$\tau_{инер}^{cm} = \frac{L_{пол} \cdot \chi}{\Delta W_z \sin \gamma}. \quad (3.28)$$

Результати обрахунку часу перебування частинки на полиці в режимі стисненого руху за різних початкових умов представлено на рисунку 3.7. Розрахунок проводився для довільно обраних довжини полиці, кута її нахилу та різниці швидкостей.

Рух дисперсної фази в міжполицевому просторі описується рівнянням руху тіла, що вилітає під кутом γ до горизонту [134]

$$h = W_{\gamma 0} \tau_{mn} - (g + F_B) \tau_{mn}^2 / 2m, \quad (3.29)$$

де h – відстань руху дисперсної фази в міжполицевому просторі у вертикальному напрямку; τ_{mn} – час руху частинки в міжполицевому просторі; $W_{\gamma 0}$ – швидкість руху дисперсної фази на виході з полиці.

Відповідно до підходу Лагранжа [130] при моделюванні двофазних течій, в яких одна з фаз, що розглядається, представлена у вигляді дисперсних частинок, рух дисперсної фази відбувається під дією суцільної фази. У разі появи дисперсних частинок в робочому об'ємі поличної сушарки вони втягуються в рух за рахунок енергії газового потоку та дії вказаних на рисунках 3.4, 3.5 сил. При цьому газовий потік віддає частину моменту кількості руху дисперсним частинкам. Спираючись на припущення про приблизну рівність швидкості газового потоку та частинки в ній, запишемо у рівнянні (3.29) $W_{\gamma 0} \approx W_g$.

Рішення рівняння (3.29) відносно τ_{mn} показало, що цей час значно менший за час перебування дисперсної фази на полиці. Для $h = 0,25 \text{ м}$, $W_{\gamma 0} = 3,2 \text{ м/с}$ і частинок поліпропілену діаметром $d_q = 2,5 \text{ мм}$ при витраті сушильного агента $27 \text{ м}^3/\text{год}$ $\tau_{mn} = 0,22 \text{ с}$. Таким чином, вважатимемо, що загальний час перебування дисперсної фази в апараті дорівнює часу перебування її на полицях каскаду, тобто

$$\tau_{nep} = \sum_1^n \tau_{inep}^{cm}. \quad (3.30)$$

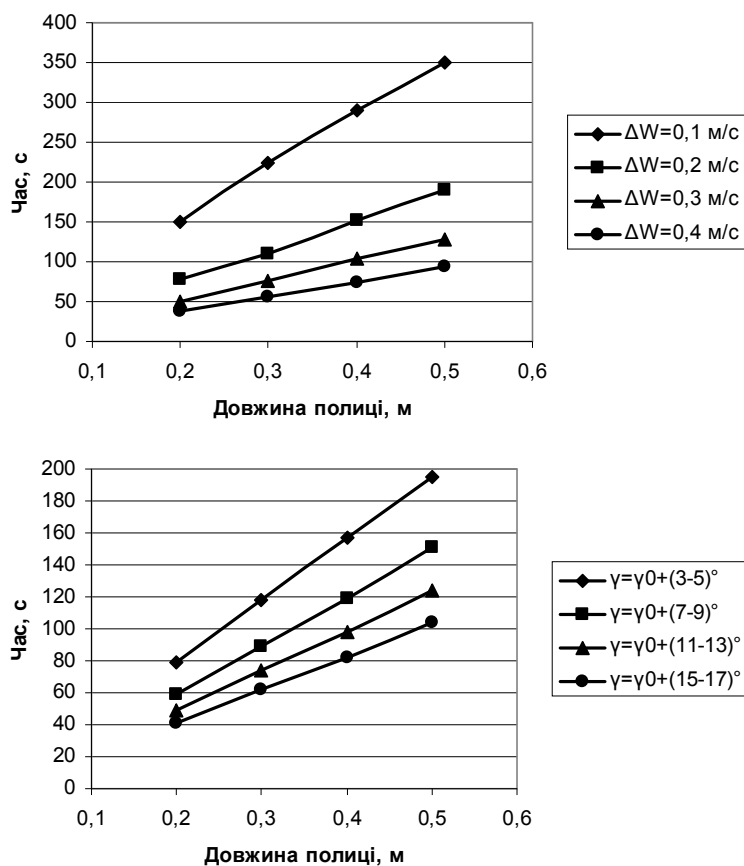


Рисунок 3.7 – Час перебування частинки на полиці (стиснений рух)

Іншим ефективним шляхом удосконалення конструкції є варіювання характеристик перфорації полиць.

Розглянемо залежність профілю висхідних швидкостей від конструктивних характеристик міжполицевого простору, зокрема, довжини полиць, ступеню їх перфорації та кута встановлення γ . При відсутності перфорації профіль висхідних швидкостей матиме характерний пік в міжполицевому просторі (рисунок 3.8, а).

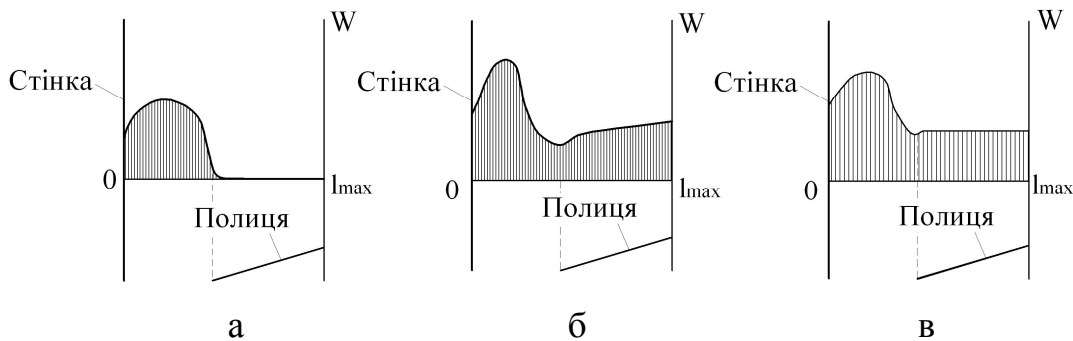


Рисунок 3.8 – Профілі швидкості газового потоку: а – неперфорована полиця; б – перфорована полиця з незмінною по довжині перфорацією; в – перфорована полиця зі змінною по довжині перфорацією

При наявності перфорації величина піка зменшується відповідно збільшенню витрат сушильного агента через отвори секціонуючих полиць (рисунок 3.8, б). Оптимізація профілю висхідних швидкостей може бути досягнута не лише зміною розвантажувального зазору та кута нахилу полиць, а й за рахунок варіювання ступеню перфорації по довжині полиць (рисунок 3.8, в) [135].

Для визначення сумарного аеродинамічного опору ΔP будемо розглядати його як сукупність опорів окремих ступенів сушарки (втрат тиску на ступенях) Δp_i :

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta p_i. \quad (3.31)$$

В свою чергу аеродинамічний опір кожного ступеню залежить від характеру взаємодії сушильного агента з полицями, встановленими під деяким кутом, кількості дисперсного матеріалу в міжполицевому просторі, що характеризується порізністю ε та наявністю перфорації полиць. Рух сушильного агента вздовж нижньої та верхньої сторони полиці можна розраховувати аналогічно загальноприйнятій проектній процедурі визначення втрат тиску в трубах.

При цьому слід зауважити, що вказаний перепад тиску в отворах буде зменшуватись вздовж полиці, відповідно і продуктивність перфораційних отворів однакового діаметру також буде знижуватись з наближенням до розвантажувального міжполицевого зазору.

Втрати тиску для елементарного струменя (лінії току), що рухається вздовж перфорованої полиці можна розглядати як суму втрат по довжині полиці з поточною координатою X та місцевих втрат через отвори перфорації:

$$\Delta p_i = const = \lambda \frac{X}{d_e} \cdot \frac{\rho_e W^2}{2} + \xi_{oms} \cdot \frac{\rho_e W_0^2}{2}, \quad (3.32)$$

де d_e – еквівалентний діаметр поличного контакту; W_0 – швидкість потоку в отворах

перфорації; $\lambda \frac{X}{d_e} \cdot \frac{\rho_e W^2}{2} = \Delta p_l$ – втрати тиску по довжині полиці з поточною коорди-

натою X (λ – коефіцієнт тертя); $\xi_{отв} \cdot \frac{\rho_2 W_0^2}{2} = \Delta p_0$ – місцеві втрати в отворі перфорації ($\xi_{отв}$ – коефіцієнт опору отвору).

Таким чином, сумарні втрати тиску між контрольними перерізами складатимуться з двох компонентів:

$$\Delta p_i = \Delta p_0 + \Delta p_l, \quad (3.33)$$

звідки

$$\Delta p_0 = \Delta p_i - \Delta p_l. \quad (3.34)$$

Характер ліній току газового потоку вздовж полиці, які підтверджують паралельне протікання двох явищ – огинання полиці та проходження крізь її отвори – експериментально одержано в підрозділі 4.2.1 дисертаційної роботи, а також знайшло підтвердження у [136].

Швидкість повітря в отворах перфорації буде зменшуватись пропорційно втратам тиску по довжині:

$$W_0 = \varphi \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_0}{\rho_2}} = \varphi \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_i - \Delta p_l}{\rho_2}} = \varphi \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_i - zX}{\rho_2}}, \quad (3.35)$$

де φ – коефіцієнт швидкості, який за експериментальними даними має значення 0,97–0,98 [137].

Враховуючи, що z є коефіцієнтом питомих втрат тиску по довжині та залежить від шорсткості поверхні полиць, з якими контактує потік повітря, що рухається вздовж полиці, методика визначення втрат по довжині аналогічна аеродинамічним розрахункам трубопроводів. У першому наближенні можна використати довідкові дані для коефіцієнтів шорсткості матеріалу [137, 138].

Запишемо витрату повітря через отвори перфорації полиці:

$$V_{пол} = \int_0^{L_{пол}} W_0 df_{пол} = \varphi \int_0^{L_{пол}} \psi \sqrt{\frac{\Delta p_i - zX}{\rho_2}} dX, \quad (3.36)$$

де $df_{пол} = dX \cdot B_{пол}$; ψ – ступінь перфорації полиці (вільний переріз полиці); $f_{пол}$ – площа полиці; $L_{пол}$ – довжина полиці.

Слід зазначити, що вираз (3.36) в такому вигляді стосується одиничної ширини полиці ($B_{пол} = 1$).

В розвантажувальному зазорі L_{pz} (рисунок 3.9) перепад тиску Δp_{pz} буде мінімальним:

$$\Delta p_{pz} = \Delta p_i - zL_{пол}, \quad (3.37)$$

а витрата повітря через нього при одиничній ширині апарата визначиться як

$$V_{pz} = \varphi \cdot L_{pz} \sqrt{\frac{\Delta p_i - zL_{пол}}{\rho_2}}. \quad (3.38)$$

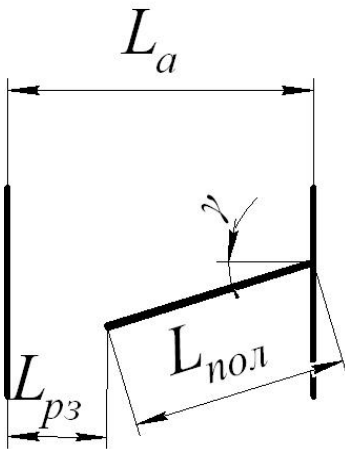


Рисунок 3.9 – Основні елементи конструкції полиці

Сумарні витрати повітря складуть $V_{пол} + V_{pz}$. Інтегруючи функцію висхідної швидкості по довжині перфорованої полиці і приймаючи ступінь перфорації ψ постійною, знайдемо витрати повітря:

$$V = \int_0^{L_{пол}} W_0 dX = \varphi \psi \int_0^{L_{пол}} \sqrt{\frac{\Delta p_i - zX}{\rho_2}} dX. \quad (3.39)$$

Заміна підінтегрального виразу функцією $y = \Delta p_i - zX$, звідки $dy = -z dX$ дозволила отримати ре-

зультат інтегрування в межах $(0, L_{пол})$:

$$V_{пол} = \frac{-\varphi\psi}{z\sqrt{\rho_2}} \int_0^{L_{пол}} y dy = \frac{2\varphi\psi}{3z\sqrt{\rho_2}} \left(\sqrt{\Delta p_i^3} - \sqrt{(\Delta p_i - zL_{пол})^3} \right). \quad (3.40)$$

В балансове рівняння витрат повітря по всьому перерізу сушарки додається частина потоку через розвантажувальний зазор:

$$W_c \cdot L_a \cdot B_a = V_{пол} + V_{pz} = \frac{2\varphi\psi}{3z\sqrt{\rho_2}} \left(\sqrt{\Delta p_i^3} - \sqrt{(\Delta p_i - zL_{пол})^3} \right) + \varphi \cdot L_{pz} \sqrt{\frac{\Delta p_i - zL_{пол}}{\rho_2}}, \quad (3.41)$$

де $W_c \cdot L_a \cdot B_a$ – сумарні витрати повітря (сушильного агента) в апараті з довжиною L_a одиничної ширини $B_a = 1$.

Аналіз рівняння (3.40) дозволяє встановити значення швидкості руху газового потоку, який відповідає переходу дисперсного матеріалу у зважений стан над перфорованою полицею одиничної ширини з площею вільного перерізу $f_{пер} = \psi L_{пол}$:

$$W_{z1}\psi L_{пол} = \frac{2\varphi\psi}{3z\sqrt{\rho_2}} \left(\sqrt{\Delta p_i^3} - \sqrt{(\Delta p_i - zL_{пол})^3} \right), \quad (3.42)$$

або з урахуванням формули (3.22)

$$W_{z1}\psi L_{пол} = \psi L_{пол} \sqrt{\frac{4d_g g(\rho_4 - \rho_{сум})}{3 \cdot \varepsilon \cdot \zeta \cdot \rho_2}} = \frac{2\varphi\psi}{3z\sqrt{\rho_2}} \left(\sqrt{\Delta p_i^3} - \sqrt{(\Delta p_i - zL_{пол})^3} \right). \quad (3.43)$$

З цього співвідношення знаходяться втрати тиску в межах одного ступеня сушарки Δp_i . При цьому є можливість варіювання конструктивними параметрами полиці (її довжиною, кутом нахилу та ступенем перфорації).

Для режиму винесення дисперсного матеріалу, при підстановці в ліву частину рівняння (3.42) значення швидкості W_{z2} з формули (3.23), одержимо відповідне

значення Δp_i . Таким чином, стає можливим визначити конструктивні параметри перфорованих полиць у робочому діапазоні функціонування апарата та отримати профілі вертикальних швидкостей над полицею та в розвантажувальному зазорі по приведеному нижче алгоритму.

Прирівнюючи сумарні витрати в отворах перфорації до витрат, розрахованих через загальну площу полиці ($W_0 \psi f_{пол} = \overline{W}_0 f_{пол}$), можна визначити середню швидкість вертикального потоку над отворами перфорації з урахуванням формули (3.35):

$$W_z = \overline{W}_0 = \psi \cdot W_0 = \psi \varphi \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_i - zX}{\rho_z}} \quad (3.44)$$

Аналіз цього виразу показав, по-перше, що місцева швидкість вертикального потоку над отворами зменшуватиметься лінійно в залежності від ступеню перфорації полиці ψ та нелінійно при віддаленні отвору X по довжині полиці в напрямку розвантажувального зазору.

По друге, профілі вертикальних швидкостей над полицею та в розвантажувальному зазорі будуть взаємозалежними і регульованими зміною конструктивних характеристик полиці (рисунок 3.10).

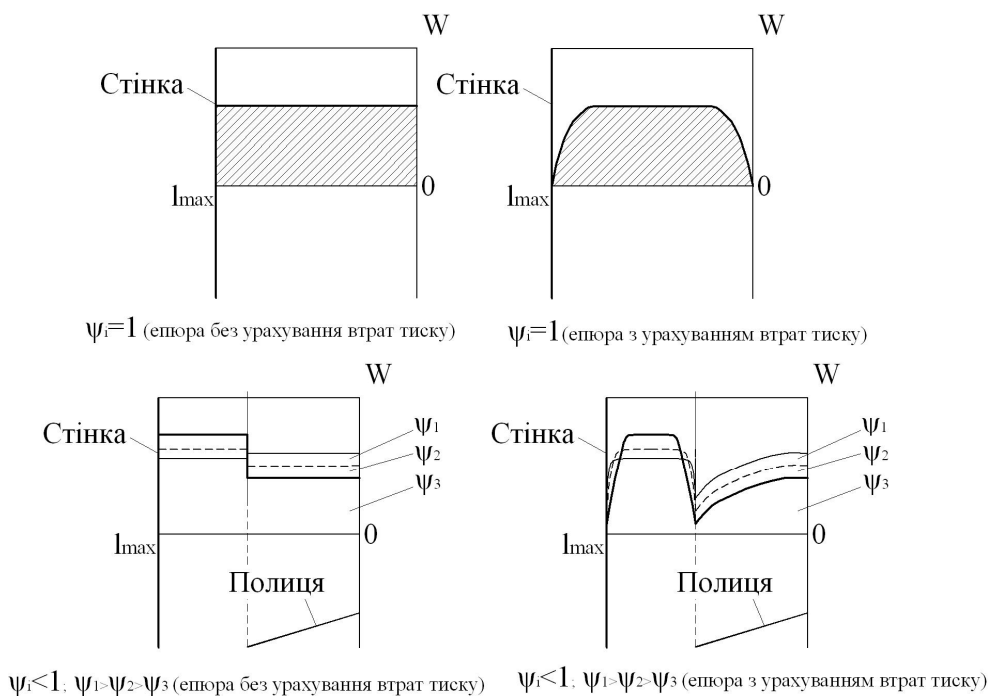


Рисунок 3.10 – Профілі вертикальних швидкостей над полицею та в розвантажувальному зазорі залежно від ступеню перфорації полиці ψ (якісна картина)

3.2.3 Опис процесу сушіння в об'ємі гравітаційної поличної сушарки

Розглянемо взаємодію потоку сушильного агента (повітря) зі структурою дисперсного матеріалу в процесі сушіння (рисунок 3.11).

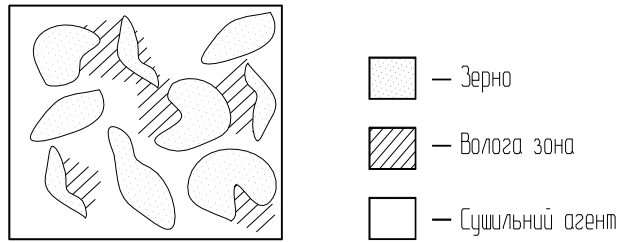


Рисунок 3.11 – Структура взаємодії потоків сушильного агента та матеріалу

Враховуючи теоретичні підходи А.В. Ликова, в дисперсній структурі взаємодіючих потоків при сушінні можна виділити дисперсний матеріал з вологими зонами, локалізованими на його поверхні та у порах, відносний об'єм яких змінюються з часом [23], але в сумі відносні об'єми матеріалу, вологих зон та сушильного агента дорівнюватимуть одиниці $v_{зер} + v_{вол} + v_{суш} = 1$, де $v_{зер}$ – відносний об'єм, що займає дисперсний матеріал. При цьому сума відповідних об'ємів вологих зон $v_{вол}$ та сушильного агента $v_{суш}$, буде дорівнювати порізності системи «тверде-газ» $v_{вол} + v_{суш} = \varepsilon$ [139].

Відома аналогія тепло- та масообмінних процесів дозволяє застосувати деякі загальні положення до розроблення математичної моделі перенесення вологи з матеріалу, що оброблюється, в потік сушильного агента. Градієнтний характер вологоперенесення в межах вологої зони, локалізованої на поверхні матеріалу визначається рівнянням [140]:

$$\frac{\partial U_z}{\partial \tau} + W_{відн} \nabla U_z = \nabla(D \nabla U_z) + j, \quad (3.45)$$

де U_z – вологість газового середовища у вологих зонах; $W_{відн}$ – відносна швидкість контактуючої твердої фази матеріалу та вологої зони; j – інтенсивність джерел парутворення відповідної зони; D – коефіцієнт дифузії.

Для спрощення рішення такого рівняння в системі координат, зв'язаній з твердою фазою при координації руху дисперсних частинок та вологих зон, локалізо-

ваних переважно в міжзерновому просторі (відсутності так званого “проковзування” вологих зон відносно твердої фази) запишемо умову $W_{відн} = 0$.

Тоді інтегрування по об’єму вологих зон $\bar{v}_{вол}$ дає:

$$\int_{\bar{v}_{вол}} \frac{\partial U_2}{\partial \tau} d\bar{v} = \int_{\bar{v}_{вол}} [\nabla(D\nabla U_2) + j] d\bar{v}. \quad (3.46)$$

Беручи також до уваги відсутність джерел додаткового пароутворення внаслідок хімічних реакцій $j = 0$, можна виключити ще одну складову цього виразу. Тоді, після переходу від об’ємного до поверхневого інтегралу в правій частині рівняння та винесення знаку диференціалу в лівій, швидкість перенесення пари з вологої зони до об’єму сушильного агента запишеться у спрощеному вигляді

$$\frac{d}{d\tau} \int_{\bar{v}_{вол}} U_2 d\bar{v} = \int_S D\nabla U_2 dS, \quad (3.47)$$

де S – поверхня вологоперенесення.

Права частина отриманого виразу на основі експериментального закону Щукарєва [38] може бути записана через різницю середніх вологостей в контактуючих зонах

$$\int_S D\nabla U_2 dS = -\beta(x - b)S, \quad (3.48)$$

де x – вологість матеріалу; b – вологість сушильного агента.

У рівнянні (3.48) вологості осереднюються по об’єму вологої зони $\bar{v}_{вол}$ та сушильного агента $\bar{v}_{суш}$:

$$x = \frac{1}{\bar{v}_{вол}} \int_{\bar{v}_{вол}} U_2 d\bar{v}, \quad (3.49)$$

$$b = \frac{1}{\bar{v}_{суш}} \int_{\bar{v}_{суш}} U_z dv . \quad (3.50)$$

Диференціал лівої частини в кінетичному рівнянні (3.47) після осереднення матиме вигляд

$$\frac{d}{d\tau}(x\bar{v}_{вол}) = -\beta(x-b)S . \quad (3.51)$$

Враховуючи, що об'єми дисперсного матеріалу, локалізованих на ньому вологих зон та сушильного агента в міжполицевому просторі кожного ступеню \bar{v}_n під час сушіння залишаються відносно постійними його частками, тобто $\bar{v}_{вол} = v_{вол}\bar{v}_n$; $\bar{v}_{суш} = v_{суш}\bar{v}_n$, а питома поверхня вологоперенесення визначається традиційним чином $s = \frac{S}{\bar{v}_n}$, кінетичне рівняння можна привести до простого вигляду з питомими характеристиками системи «тверде-газ»

$$v_{вол} dx = -\beta(x-b)sd\tau . \quad (3.52)$$

При практичному застосуванні отриманого рівняння слід мати на увазі ті припущення, з яких воно виведене, тому що сушіння характеризується комплексом інших парціальних механізмів тепломасоперенесення, які мають градієнтний характер. Так, ряд парціальних лімітуючих процесів пропорційні різниці температур вологої зони матеріалу та основного об'єму сушильного агента. Згідно гіпотези Люїса щодо співвідношення коефіцієнтів тепло- та масовіддачі, перенесення водяної пари з вологих зон в потік сушильного агента за рахунок різниці вологовмісту теж матиме градієнтний характер [141]. Виходячи з цього, зміна питомого тепловмісту сушильного агента (повітря) під час охолодження в контакті з дисперсним матеріалом (частинкою) запишеться у вигляді:

$$dq = d(c_g \cdot \rho_g \cdot v_{суш} \cdot b \cdot t) = -\alpha s(t-t')d\tau , \quad (3.53)$$

де t – температура сушильного агента; t' – температура матеріалу; c_g – теплоємність

води.

Питомий тепловміст потоку частинок в шарі буде відрізнятися лише знаком, у зв'язку з нагріванням матеріалу за рахунок сушильного агента:

$$dq' = d(c_s \cdot \rho_m \cdot v_{вол} \cdot x \cdot t') = \alpha s(t - t')dt, \quad (3.54)$$

де ρ_m – густина матеріалу.

Під знаком диференціалу в обох рівняннях фігурують дві змінні – температура та вологість, але залежність вологості від температури дозволяє спростити вирази (3.53), (3.54). В моделі прийнято усереднені значення вмісту вологи в зонах, що безпосередньо прилягають до поверхні матеріалу і у вільному об'ємі повітря. Зауважимо, що добуток питомого тепловмісту та витрат сушильного агента характеризує дійсну величину інтенсивності теплообміну (тепловий потік) під час сушіння $Q = q \cdot V_{суш}$.

Аналіз експериментальних даних температур та вологості повітря і матеріалу в процесі сушіння підтверджує існування кореляції між ними (рисунок 3.12). При цьому вологість у вологій зоні матеріалу зменшується з підвищенням температури і може бути апроксимована функцією:

$$x = \theta' + \frac{\chi'}{t'}, \quad (3.55)$$

де θ' , χ' – параметри апроксимуючої кривої для вологої зони матеріалу.

Аналогічно, вологість сушильного агента b збільшується зі зменшенням його температури в процесі сушіння і також апроксимується аналогічним виразом:

$$b = \theta + \frac{\chi}{t}, \quad (3.56)$$

де θ , χ – параметри апроксимуючої кривої для повітря.

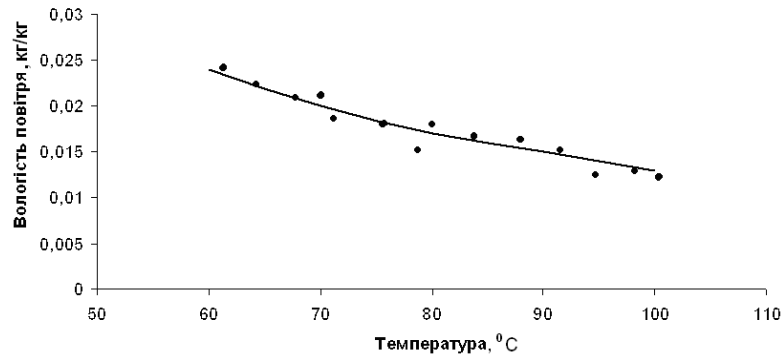


Рисунок 3.12 – Апроксимація зміни вологості повітря в залежності від температури

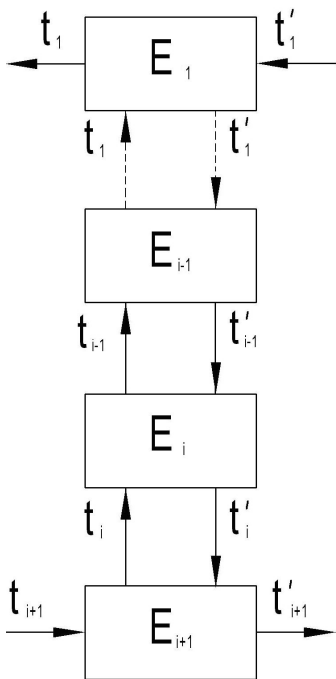


Рисунок 3.13 – Розрахункова схема поличної сушарки

Обидві залежності можуть бути легко лінеаризовані введенням оберненої функції температури $r = 1/t$ з подальшою статистичною обробкою. Необхідно відмітити, що параметри апроксимуючих гіпербол визначаються за методом найменших квадратів [142], їх деталізація проведена при обґрунтуванні методики розрахунку інтегральних параметрів процесу на кожному ступені сушарки (рисунок 3.13).

Апроксимуюча гіпербола (температурно-вологісна крива) може бути використана для опису інших аналогічних процесів тепломасоперенесення заміною відповідних рівнянь [143].

Для температур маємо систему:

$$\left. \begin{aligned} dt &= \frac{-\alpha s(t-t')}{v_{\text{суш}} \cdot c_g \cdot \rho_g \cdot \theta} d\tau \\ dt' &= \frac{\alpha s(t-t')}{v_{\text{вол}} \cdot c_g \cdot \rho_m \cdot \theta'} d\tau \end{aligned} \right\} \quad (3.57)$$

Віднімаючи від першого рівняння друге, отримаємо простий диференціал, що легко інтегрується:

$$d(t-t') = -\frac{\alpha s}{c_g} \cdot \left(\frac{1}{v_{\text{суш}} \cdot \rho_g \cdot \theta} + \frac{1}{v_{\text{вол}} \cdot \rho_m \cdot \theta'} \right) (t-t') d\tau. \quad (3.58)$$

В результаті отримаємо кінетику процесу стосовно температур для і-го ступеню сушіння:

$$\frac{t_{i-1} - t'_i}{t_i - t'_{i-1}} = \exp(-A\tau), \quad (3.59)$$

де A – кінетичний температурний параметр процесу; $A = \frac{\alpha s}{c_\theta} \cdot \left(\frac{1}{v_{\text{суш}} \cdot \rho_z \cdot \theta} + \frac{1}{v_{\text{вол}} \cdot \rho_m \cdot \theta'} \right)$

з аналізу рівняння (3.57).

Аналогічні міркування дають підстави для запису кінетики перенесення водяної пари у вигляді

$$\frac{x_i - b_{i-1}}{x_{i-1} - b_i} = \exp(-B\tau), \quad (3.60)$$

де B – кінетичний параметр перенесення вологи; $B = \frac{\beta s}{c_\theta} \cdot \left(\frac{1}{v_{\text{суш}} \cdot \rho_z \cdot \theta} + \frac{1}{v_{\text{вол}} \cdot \rho_m \cdot \theta'} \right)$;

методика визначення коефіцієнта масовіддачі (вологовіддачі) представлена в підрозділі 4.3.1.

Таким чином, маємо два кінетичних рівняння з чотирма невідомими (t_{i-1} ; t'_i ; x_{i-1} ; b_{i-1}).

Додамо ще одне рівняння теплового балансу потоків дисперсного матеріалу та сушильного агента:

$$G_m c_m (t'_i - t'_{i-1}) + G_m c_\theta (x_i t'_i - x_{i-1} t'_{i-1}) = G_{\text{суш}} c_z (t_i - t_{i-1}) + G_{\text{суш}} c_\theta (b_i t_i - b_{i-1} t_{i-1}), \quad (3.61)$$

де t'_i , x_i – відповідно температура та вологість матеріалу в і-му ступені сушарки; t_i , b_i – відповідно температура та вологість повітря в і-му ступені сушарки; c_m – теп-

лоємність матеріалу; c_2 – теплоємність газу (повітря); G_m – витрата сухого матеріалу; $G_{суш}$ – витрата сушильного агента.

Замикання системи досягається останнім (четвертим) рівнянням матеріального балансу вологості потоків матеріалу та сушильного агента, що взаємодіють в протитечійному режимі:

$$G_m(x_{i-1} - x_i) = G_{суш}(b_{i-1} - b_i) . \quad (3.62)$$

Розглянемо типовий графік зниження вологості частинки від її початкового нагрівання (ділянка АВ), ділянки постійної швидкості (BC) до періоду спадаючої швидкості процесу (CD) (рисунок 3.14).

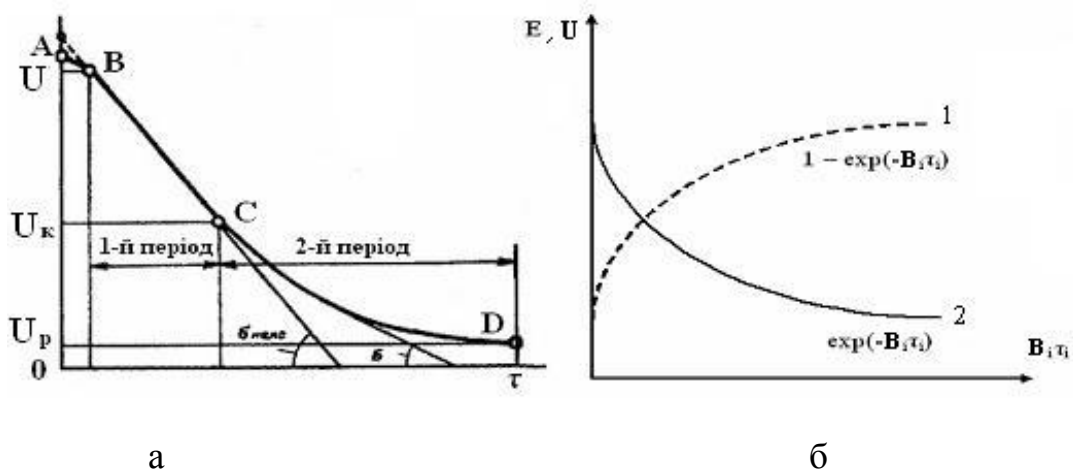


Рисунок 3.14 – Графічне зображення процесу сушіння: а – типовий графік сушіння; б – експоненційна модель процесу для одного ступеню сушарки: 1 – ефективність сушіння; 2 – теоретичне зниження вологості на i – ому ступені сушарки; $B_i \tau_i$ – кінетична характеристика процесу; τ_i – час контакту матеріалу з сушильним агентом на i – ому ступені сушарки

Вплив того чи іншого парціального механізму масоперенесення на кожній з вказаних стадій буде різним, але градієнтний характер перенесення вологи від центральних шарів частинки в потік сушильного агента можна вважати узагальнюючим фактором при розробці базової оптимізаційної моделі [144].

Розглянемо вологісні характеристики потоків на i -ому ступені сушарки.

З розрахункової схеми неважко побачити, що максимальна різниця вологостей на ступені відповідає різниці початкової вологості дисперсного матеріалу (або кінцевої вологості матеріалу, що надходить з попереднього ступеню) та початкової вологості сушильного агента, тобто $\Delta x_{\text{макс}} = x_{i-1} - b_i$. З іншого боку, на ступені з дисперсного матеріалу видаляється $\Delta x = x_{i-1} - x_i$ вологи. Відношення $\frac{\Delta x}{\Delta x_{\text{макс}}}$ буде характеризувати ефективність видалення вологи на i -му ступені E_i .

Враховуючи те, що крива сушіння має експоненційний характер $U = \exp(-B_i \tau_i)$ (рисунок 3.14, б) [119], будемо вважати, що ефективність сушіння з точки зору зниження вологості також буде мати експоненціальну функцію (рисунок 3.14, б). Це припущення базується на теоретичних підходах до опису інших тепломасообмінних процесів [38] з урахуванням, що збільшення інтенсивності видалення вологи пропорційно підвищенню ефективності сушіння E_i . Слід зазначити, що кількість видаленої вологи за одиницю часу зі збільшенням часу сушіння починає зменшуватись, а ефективність сушіння E_i найбільш стрімко зростає внаслідок збільшення часу сушіння τ_i на ступені. Зі збільшенням часу сушіння $\frac{\Delta x}{\Delta x_{\text{макс}}} \rightarrow 1$ і $E_i \rightarrow 1$.

При поточному часі сушіння можемо записати

$$E_i = 1 - \exp(-B_i \tau_i). \quad (3.63)$$

Збільшити різницю $x_{i-1} - x_i$ та наблизитись до максимального можливого значення E_i на ступені стає можливим за рахунок збільшення витрати сушильного агента $G_{\text{суш}}$ по відношенню до витрати дисперсного матеріалу G_m ($G_i^{-1} = \frac{G_m}{G_{\text{суш}}}$). Для встановлення впливу співвідношення витрат на ефективність сушіння віднесемо (3.63) до G_i^{-1} у вигляді $1 + G_i^{-1}$ (у тому числі ввівши цей показник у підекспоненціальний вираз).

Виходячи з наведених вище міркувань представимо ефективність сушіння на i -ому ступені сушарки як відношення різниці вологостей дисперсного матеріалу до та після сушіння $x_{i-1} - x_i$ та максимальної можливої (теоретичної) різниці вологостей потоків на ступені $x_{i-1} - b_i$, а також у вигляді функції кінетичного параметру перенесення вологи B_i , часу перебування матеріалу на ступені τ_i та відношення витрати потоку дисперсної фази до витрати сушильного агента G_i^{-1}

$$E_i = \frac{\Delta x}{\Delta x_{\max}} = \frac{x_{i-1} - x_i}{x_{i-1} - b_i} = \frac{1 - \exp[-B_i \tau_i (1 + G_i^{-1})]}{1 + G_i^{-1}}. \quad (3.64)$$

Зазначимо, що при досить великих значеннях характеристики $B_i \tau_i$ (до максимуму – нескінченному часі перебування матеріалу на ступені) у чисельнику цього виразу буде 1 ($\exp[-B_i \tau_i (1 + G_i^{-1})] = 0$), а граничне значення ефективності буде залежати лише від співвідношення витрат $G_m / G_{\text{суш}}$.

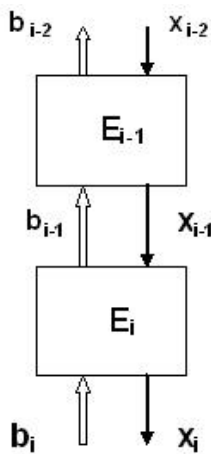


Рисунок 3.15 – Фрагмент розрахункової схеми багатоступеневого процесу сушіння

Фрагмент розрахункової схеми багатоступеневої протитечійної сушарки має вигляд, зображений на рисунку 3.15. Розглянемо показники вологості взаємодіючих потоків на останніх двох ступенях процесу сушіння з ефективністю E_i та E_{i-1} .

Система рівнянь, що зв'язують кінетику та матеріальний баланс вологості для $i-1$ ступеня сушарки мають вигляд

$$\begin{cases} x_{i-1} = \frac{x_i - E_i b_i}{1 - E_i} \\ b_{i-1} = b_i + \frac{G_m}{G_{\text{суш}}} E_i (x_{i-1} - b_i) \end{cases}. \quad (3.65)$$

Припускаючи, для спрощення викладок, що сушильний агент (повітря) має нульову вологість, тобто $b_i = 0$, отримуємо таку систему:

$$\begin{cases} x_{i-1} = \frac{x_i}{1 - E_i} \\ b_{i-1} = \frac{G_m}{G_{суш}} E_i x_{i-1} \end{cases} \quad (3.66)$$

Для $i-2$ ступеню система (3.65) матиме вигляд:

$$\begin{cases} x_{i-2} = \frac{x_{i-1} - E_{i-1} b_{i-1}}{1 - E_{i-1}} \\ b_{i-2} = b_{i-1} + \frac{G_m}{G_{суш}} E_{i-1} (x_{i-2} - b_{i-1}) \end{cases} \quad (3.67)$$

Враховуючи (3.66), вологість дисперсного матеріалу перед $i-1$ ступенем сушарки залежатиме від початкової вологості повітря b_i та кінцевої вологості матеріалу після сушарки x_i таким чином:

$$x_{i-2} = \frac{\frac{x_i}{1 - E_i} - \frac{G_m}{G_{суш}} E_{i-1} E_i \frac{x_i}{1 - E_i}}{1 - E_{i-1}} = \frac{x_i (1 - \frac{G_m}{G_{суш}} E_{i-1} E_i)}{(1 - E_{i-1})(1 - E_i)} \quad (3.68)$$

Таким чином, найпростіші апроксимації ефективності двох суміжних ступенів сушарки у при фіксованому співвідношенні витрат взаємодіючих потоків частинки та сушильного агента $G_i^{-1} = \frac{G_m}{G_{суш}}$ дає максимальне перевищення вологості матеріалу, що подається на каскад, над кінцевою вологістю матеріалу x_i за умови рівної ефективності ступенів, тобто при $E_{i-2} = E_{i-1}$.

3.3 Висновки до третього розділу

1. Запропонована фізична модель руху взаємодіючих потоків, що дає змогу визначити періоди сушіння дисперсного матеріалу щодо особливостей проведення даного процесу в гравітаційній поличній сушарці.

2. Створено трирівневу математичну модель процесу сушіння дисперсних матеріалів в гравітаційній поличній сушарці, яка враховує:

– закономірності сушіння одиночної частинки та їх сукупності з визначенням часу нагрівання та зневоднення за залежностями (3.15) та (3.17);

– гідродинаміку руху газового потоку, одиночної частинки та дисперсного матеріалу в режимі стисненого потоку з визначенням гідродинамічного часу перебування дисперсної фази в робочому просторі сушарки в режимі вільного та стисненого руху за залежностями (3.25) та (3.28);

– ефективність ступеневого сушіння дисперсного матеріалу на кожній полиці каскаду і в апараті в цілому на основі зіставлення даних розрахунку гідродинамічного і кінетичного часу перебування та оцінювання впливу організації взаємного руху потоків за залежністю (3.64);

Елементи математичної моделі на кожному рівні є узагальнюючим по відношенню до попереднього і враховують інтегральні параметри сушарки.

3. Визначено вплив конструкції сушарки та технологічних характеристик сушильного агента на умови перебігу процесу сушіння при зміні температурно-вологісних параметрів взаємодіючих потоків.

4. Показано, що зміна ефективності сушіння описується експоненційним законом. Основним чинником, який впливає на ефективність сушіння на кожному ступені сушарки, є час контакту з сушильним агентом.

Основні положення розділу опубліковані в працях [113,114,135,139,143,144].

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ В ГРАВІТАЦІЙНИХ ПОЛИЧНИХ АПАРАТАХ

4.1 Мета та задачі експериментальних досліджень

Основна мета проведення експерименту при розробленні процесів та апаратів хімічної технології – перевірка адекватності запропонованої математичної моделі гідродинаміки руху однофазного і двофазного потоків в робочому об'ємі поличної сушарки та кінетики сушіння дисперсного матеріалу на дослідній установці. Розроблена теоретична модель повинна пройти перевірку експериментальними дослідженнями. На основі зіставлення результатів експерименту та теоретичного опису процесу, який досліджується, приймається рішення про можливість використання математичної моделі для розрахунку процесу сушіння дисперсних матеріалів і відповідно проектування промислових поличних сушарок.

Задача експериментальних досліджень полягла у встановленні впливу технологічних (витрата, швидкість руху газового потоку) та конструктивних (геометричних розмірів, конфігурації окремих елементів пристрою) параметрів на гідродинаміку потоків у робочому просторі поличної сушарки та кінетику видалення вологи з дисперсного матеріалу.

Роботу дослідного зразка гравітаційної поличної сушарки експериментально досліджено на лабораторній установці кафедри «Процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв» (ПОХНВ) Сумського державного університету (СумДУ).

4.2 Дослідження гідродинаміки руху потоків у гравітаційній поличній сушарці

Специфічний аеродинамічний режим сушіння в поличних апаратах характеризується підвищенням локальних чисел Рейнольдса в місцях перфорації та розвантаження полиць. В прийнятій моделі простір між полицями розглядається як окре-

мий тепломасообмінний ступінь. Слід відмітити, що на кожній з полиць в такому каскаді створюється досить ефективне перемішування з усіма перевагами протитечійного режиму.

Для проведення експериментальних досліджень використано набір поличних контактів різної довжини, які забезпечують регулювання кута їх встановлення в межах 0–45 градусів до горизонту. При цьому значення зазору між кінцем полиці та стінкою сушарки (розвантажувальний зазор) може змінюватись до 0,5 довжини апарата. Поличні контакти мають різне значення площі вільного перерізу, яка має значення $\psi = 15\%$; 20% ; 25% ; 30% . В експериментальному зразку поличної сушарки встановлюється набір контактів; при цьому всі вони або мають одну конструкцію, або відрізняються довжиною і значенням вільного перерізу [145].

Під час проведення серії досліджень із кожним набором поличних контактів визначено поле швидкості руху газового потоку, траєкторію і час перебування дисперсного матеріалу в поличній сушарці.

На підставі заміру швидкості руху газового потоку та дослідження руху «мічених» частинок визначені характерні зони розподілення потоків і оцінена рівномірність створення зваженого шару.

Для вивчення кінетики процесу видалення вологи з дисперсного матеріалу попередньо зволожений та нагрітий до визначених параметрів дисперсний матеріал подається на верхню полицю сушарки, проходить кожен зі ступенів, контактуючи з висхідним потоком повітря, який має визначену температуру і вологість. На кожному зі ступенів проводиться замір вологи і температури дисперсного матеріалу і сушильного агента.

Витрата сушильного агента складає 24,6–48 м³/год (31,7–62 кг/год), витрата матеріалу – 12–15 кг/год. Модельні матеріали – поліпропілен ($d_v = 3–3,5$ мм), аміачна селітра ($d_v = 2–2,5$ мм), суміш цих матеріалів (від 20 до 30 % аміачної селітри, залишок – поліпропілен).

4.2.1 Гідродинаміка руху газового потоку

Якісна картина розподілення швидкості руху газового потоку в надполичному просторі і розвантажувальному зазорі має вигляд, представлений на

рисунку 4.1 а. Характер розподілу складових повної швидкості руху газового потоку в робочому просторі поличної сушарки досліджувався за допомогою кульового 5-канального аеродинамічного зонда згідно методики, наведеної в розділі 2.4.2.

Довжина зони I визначається довжиною поличного контакту та кутом його встановлення. Закон розподілення швидкості в цій зоні залежить від величини вільного перерізу полиці, її довжини, кута її встановлення і витрат газового потоку. Довжина зони II визначається величиною розвантажувального зазору, закон розподілення швидкості в ній залежить від конструкції поличного контакту та витрат газового потоку [93].

Основні конструктивні розміри поличної сушарки наведено на рисунку 4.1 б.

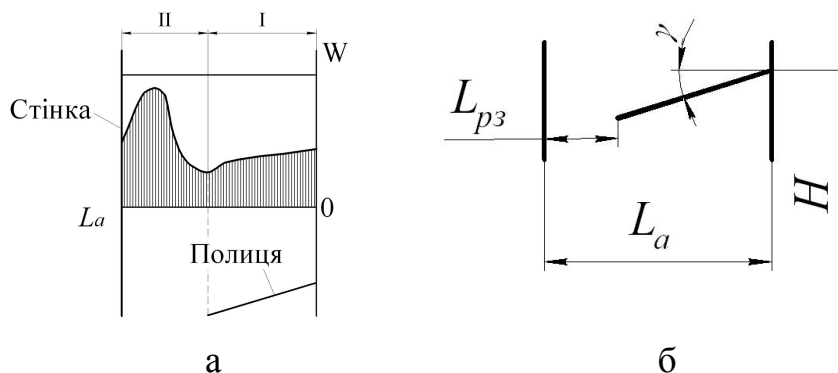


Рисунок 4.1 – Схема ступеню поличної сушарки: а – епюра розподілення швидкості руху газового потоку; б – конструктивна схема: L_{pz} – довжина розвантажувального зазору, L_a – довжина апарата, γ – кут нахилу полиці, H – висота розташування полиці

Нижче проводиться аналіз епюр розподілення газового потоку по довжині апарата в надполичному просторі і розвантажувальному зазорі залежно від конструктивних параметрів поличного контакту (величини розвантажувального зазору, висоти та кута встановлення, вільного перерізу) та витрат газового потоку (в подальшому відношення довжини розвантажувального зазору L_{pz} до довжини апарата L_a буде позначено як величина X/L).

Витрата газового потоку при проведенні експериментальних досліджень гідродинаміки руху однофазного потоку складає 24,6 м³/год (окрім дослідження впливу витрати газового потоку на поле його швидкості в над поличному просторі).

При встановленні поличних контактів з різним розвантажувальним зазором епюра розподілення швидкості руху газового потоку (рисунок 4.2) має такі особливості:

– розподілення швидкості руху газового потоку має низхідний характер від стінки апарата до кінця поличного контакту. Це обумовлено різним перепадом по довжині тисків під поличним контактом і над ним;

– при зменшенні величини X/L , починаючи з середини поличного контакту, відбувається інтенсивне зниження швидкості руху газового потоку, яке обумовлене створенням вихрів в розвантажувальному зазорі. Зменшення величини розвантажувального зазору призводить до збільшення інтенсивності вихрів на кінці поличного контакту, який порушує висхідний рух газового потоку;

– значення мінімуму швидкості руху газового потоку на поличному контакті тим більше, чим менша величина розвантажувального зазору.

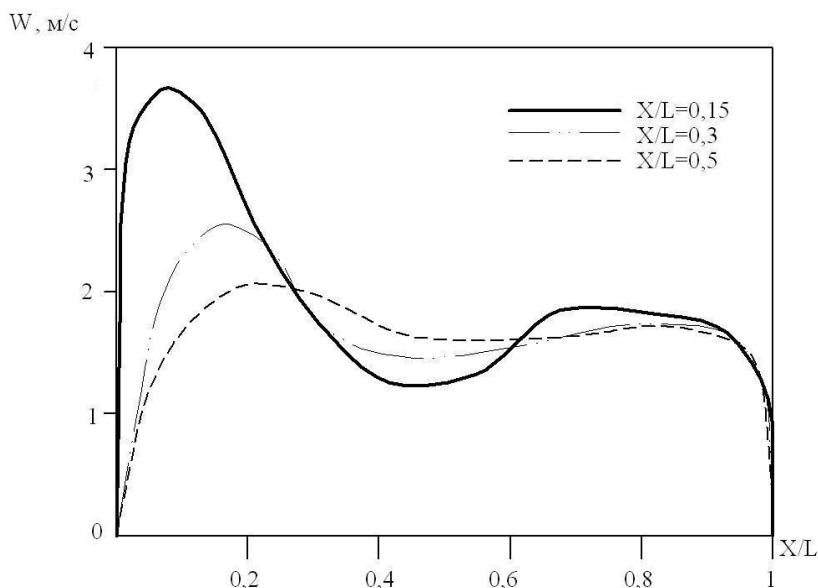


Рисунок 4.2 – Епюра розподілення швидкості руху газового потоку по довжині апарата залежно від величині зазору X/L при висоті встановлення поличного контакту $H = 0,25$ м, величині вільного перерізу поличного контакту $\psi = 15$ % та кута нахилу поличного контакту $\gamma = \gamma_0 + (11-13)^\circ$

Характер розподілу швидкості газового потоку на ступені поличної сушарки при інших умовах проведення експериментальних досліджень (конструктивне виконання полиці і витрата газового потоку) якісно не змінюється. Особливості розподі-

лу поля швидкості газового потоку залежно від початкових умов проведення експерименту наведено нижче.

Аналіз результатів експерименту стосовно розподілення швидкості руху газового потоку на різних ступенях сушарки залежно від висоти їх встановлення при однаковому конструктивному виконанні кожного ступеня показав, що:

- розподілення швидкості руху газового потоку стає більш рівномірним зі збільшенням значення розвантажувального зазору;

- епюра швидкості руху газового потоку для поличного контакту однієї конструкції кількісно змінює свій профіль. Це пояснюється перерозподілом газового потоку по перерізу сушарки за висотою, причому з висотою він стає більш рівномірним.

При встановленні в об'ємі сушарки поличного контакту з різним значенням величини вільного перерізу (збільшення величини вільного перерізу) спостерігається така картина:

- частково вирівнюється профіль швидкості руху газового потоку на поличному контакті;

- спостерігається зменшення піку швидкості руху газового потоку в розвантажувальному зазорі;

- епюра швидкості руху газового потоку в місці переходу від поличного контакту до розвантажувального зазору має більш плавний характер.

Зменшення кута встановлення поличного контакту при постійному значенні зазору X/L вносить свої особливості в епюру розподілення швидкості руху газового потоку:

- відбувається зменшення піку швидкості руху газового потоку на полиці, епюра вирівнюється;

- пік швидкості руху газового потоку в розвантажувальному зазорі зменшується;

- зона максимальної швидкості руху газового потоку в розвантажувальному зазорі розширюється з вирівнюванням епюри.

Епюра розподілення швидкості руху газового потоку зі збільшенням його витрати має однаковий якісний закон, але характеризується такими відмінними рисами:

- згладжування піку в середині поличного контакту;
- вирівнювання швидкості по довжині поличного контакту;
- пік швидкості руху газового потоку в розвантажувальному зазорі має більш яскраво виражений характер.

Епюри розподілу швидкості руху газового потоку дають можливість визначити зони гравітаційного руху дисперсного матеріалу, його витання в апараті, сепарації та можливого винесення. Для повного опису гідродинаміки руху дисперсного матеріалу, визначення траєкторії його руху та часу перебування в об'ємі сушарки та впливу на ці параметри конструкції поличного контакту та витрати газового потоку необхідно дослідити основні режими переміщення дисперсного матеріалу.

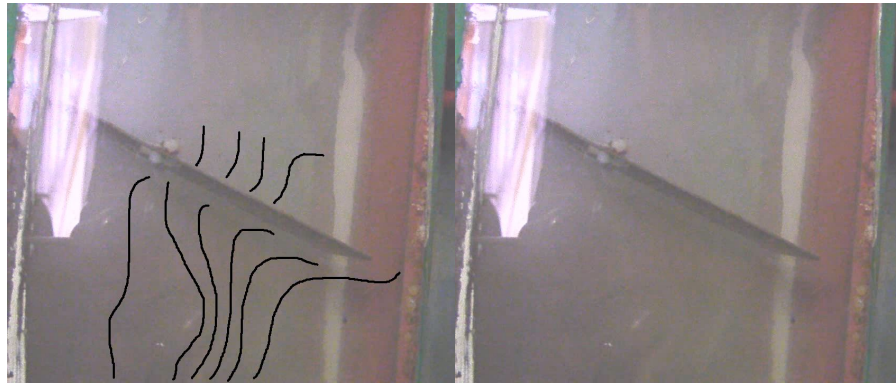
При експериментальному вивченні гідродинамічних умов руху газового потоку в сушарці виявлено, що газовий потік частково огинає поличний контакт і частково проходить крізь його отвори. Ці результати корелюються з математичним описом зміни швидкості руху газового потоку по довжині полиці.

Спостерігається огинання полиці газовим потоком, проходження газу через отвори і через розвантажувальний зазор (рисунок 4.3). Віддаляючись від стінки (початок полиці) траєкторія руху газового потоку викривляється і все виразніше починає проходити під полицею.

Результати експериментальних досліджень корелюються з даними комп'ютерного моделювання (рисунок 4.3 в) [146, 147].

При однаковому значенні площі живого перерізу полиці, але різному діаметрі і кількості отворів огинання її газовим потоком відбувається по-різному:

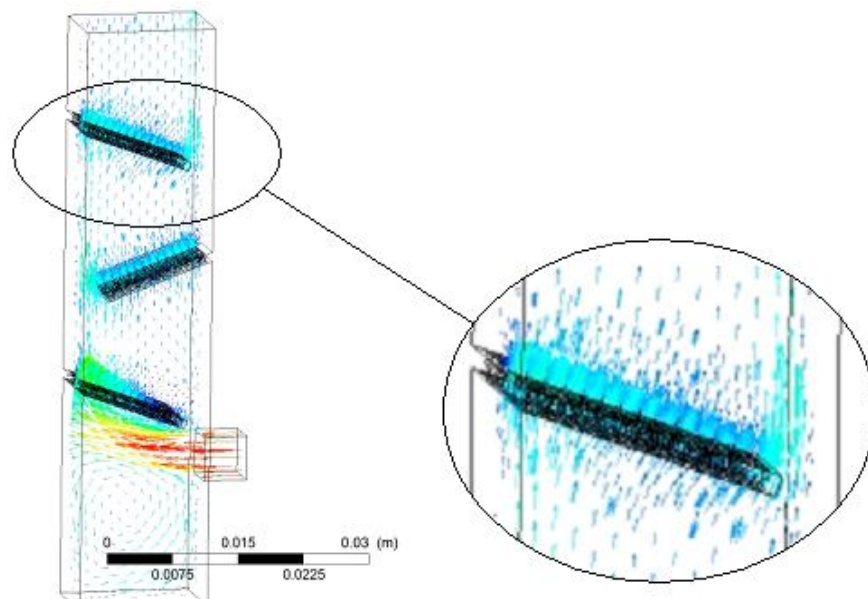
- при меншому діаметрі і більшій кількості отворів огинання газовим потоком полки спостерігається чітко;
- при збільшенні діаметра отворів і зменшення їх кількості огинання газовим потоком полиці стає менш помітним, і газ переважно проходить через отвори, в меншій мірі огинаючи полицю.



а



б



в

Рисунок 4.3 – Дослідження траєкторії руху газового потоку в межах контакт-ного ступеню: а – метод димової завіси (експеримент): $X/L = 0,3$, $H = 0,5$ м, $\psi = 25$ %, $\gamma = \gamma_0 + (11-13)^\circ$, $V = 24,6$ м³/год; б – метод натягнутих ниток (експери-мент): $X/L = 0,3$, $H = 0,5$ м, $\psi = 25$ %, $\gamma = \gamma_0 + (11-13)^\circ$, $V = 24,6$ м³/год; в – результати комп'ютерного моделювання (програмний продукт ANSYS)

4.2.2 Гідродинаміка руху дисперсного матеріалу

При проведенні експериментальних досліджень руху дисперсного матеріалу в поличній сушарці, крім зазначеного вище, стає можливим додатково визначити вплив руху пакетів частинок один на одного (зони зіткнення пакетів, вихроутворення руху дисперсного матеріалу з більшою чи меншою інтенсивністю і т.п.). Модельний матеріал: 75 % поліпропілену ($d_{\text{ч}} = 3\text{--}3,5$ мм, $x = 1,7$ %) та 25 % аміачної селітри ($d_{\text{ч}} = 2\text{--}2,5$ мм, $x = 0,2$ %).

Основні режими руху дисперсного матеріалу, визначені за результатами експериментальних досліджень:

1. Режим гравітаційного падаючого шару (рисунок 4.4). Цей режим досліджено при витраті сушильного агента $24,6$ м³/год і дисперсного матеріалу 12 кг/год.



Рисунок 4.4 – Робота сушарки у режимі гравітаційного падаючого шару дисперсного матеріалу

Дисперсний матеріал рухається по поверхні полиці за рахунок сили інерції, яка зумовлена передачею йому імпульсу при завантаженні з патрубку чи при переході з попередньої полки, та сили скочування по похилій поверхні. При цьому дія сили висхідного потоку сушильного агента не чинить значного впливу на режим руху дисперсного матеріалу. В такому режимі швидкість газового потоку менше значення першої критичної швидкості газового потоку, яка відповідає режиму зваження. Це значення розраховується по формулі (3.22) для гранул модельного матеріалу заданого розміру.

2. Перший перехідний режим (рисунок 4.5): витрата сушильного агента 30 м³/год, дисперсного матеріалу – 12 кг/год.

Дія сили висхідного потоку сушильного агента в даному режимі призводить

до поступової зміни траєкторії його руху з поступальної до поступально-пульсаційної у напрямку розвантажувального зазору. При цьому дисперсний матеріал починає переходити у зважений стан, значення сили інерції компенсується силою висхідного потоку сушильного агента, поступальний напрям руху обумовлений лише силою скочування по похилій поверхні. В такому режимі швидкість газового потоку наближається до значення першої критичної швидкості газового потоку.



Рисунок 4.5 – Перший перехідний режим роботи сушарки

3. Режим зваженого шару (рисунок 4.6): витрата сушильного агента 33–45 м³/год, дисперсного матеріалу – 12–15 кг/год. Дія сили висхідного потоку теплоносія в такому режимі призводить до створення стабільного зваженого шару за рахунок компенсації сили інерції та сили скочування по похилій поверхні. Швидкість газового потоку досягає значення першої критичної та в подальшому підвищується і знаходиться в діапазоні робочої швидкості.

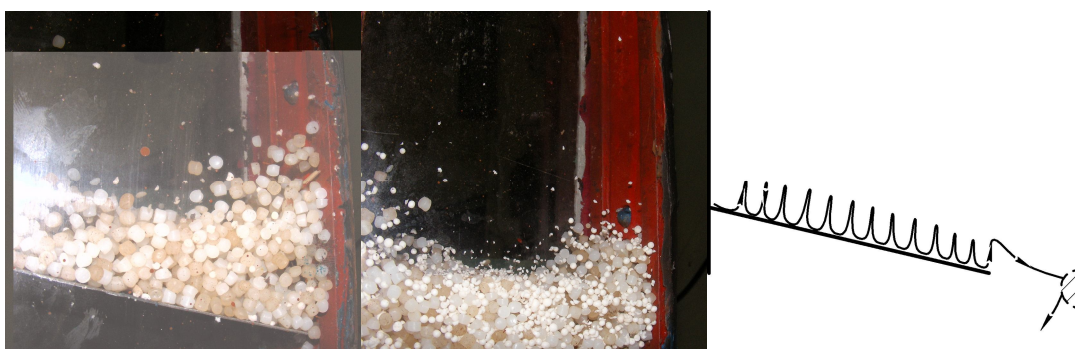


Рисунок 4.6 – Робота сушарки у режимі зваженого шару дисперсного матеріалу

В такому режимі на контактній полиці сушарки і в розвантажувальному зазорі виникає декілька характерних зон (рисунок 4.7). В зоні створення зваженого шару і рух дисперсного матеріалу відбувається за рахунок його поступально-пульсаційного переміщення до розвантажувального зазору; в зоні пониження інтен-

сивності зваженого шару 2 за рахунок зменшення швидкості руху сушильного агента внаслідок зменшення перепаду тиску по довжині полиці дисперсний матеріал втрачає частину вертикального переміщення вздовж вісі пристрою.

По мірі переміщення до кінця полиці дисперсний матеріал поступово проходить зони створення вихору 3, яка утворюється при огинанні сушильним агентом полиці, зону підвищеної швидкості руху над розвантажувальним зазором 4 і відводиться з полиці через зону 6. За умови сушіння полідисперсного дисперсного матеріалу дрібна фракція визначеного розрахунками розміру сепарується в зоні 5.

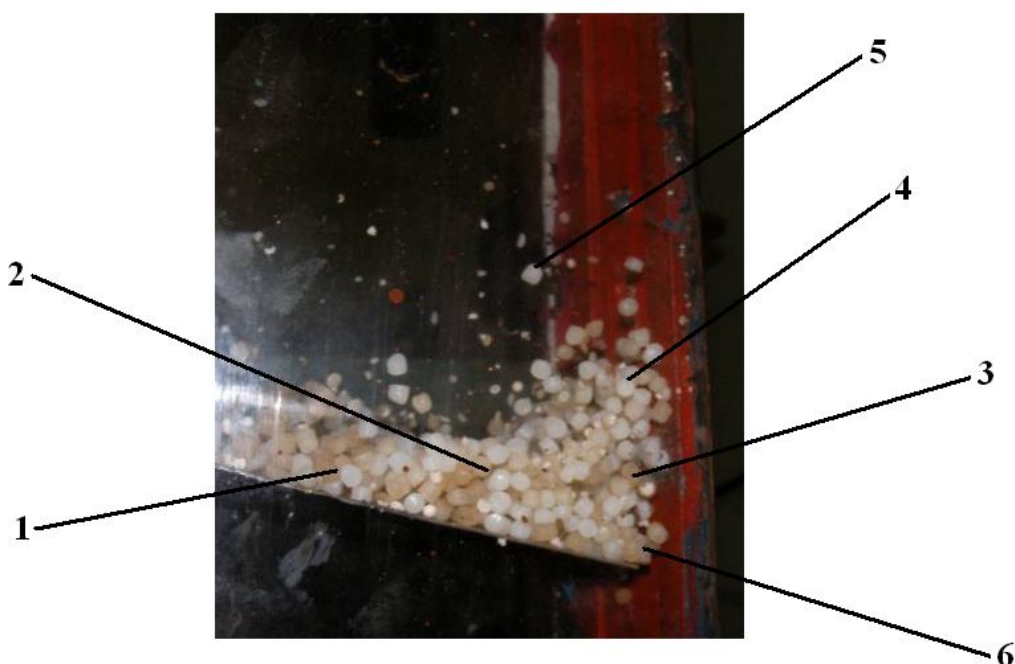


Рисунок 4.7 – Характерні зони руху дисперсного матеріалу в гравітаційному поличному апараті: 1 – зона створення зваженого шару на полиці; 2 – зона пониження інтенсивності зваженого шару; 3 – зона створення вихору; 4 – зона підвищеної швидкості руху дисперсного матеріалу над розвантажувальним зазором; 5 – зона сепарації дрібного дисперсного матеріалу; 6 – зона вивантаження дисперсного матеріалу з полиці

4. Другий перехідний режим (рисунок 4.8): витрата сушильного агента 36–47,3 м³/год, дисперсного матеріалу – 12–13,5 кг/год. Цей режим характеризується переважною дією на дисперсний матеріал сили висхідного потоку, збільшенням вертикальної складової його переміщення; при цьому частина дисперсного матеріалу по-

чинає виноситись з поверхні полиці до надходження в розвантажувальний зазор. Значення швидкості газу для даного режиму знаходиться у діапазоні між розрахованим значеннями першої критичної швидкості та швидкості винесення (з формули 3.23).



Рисунок 4.8 – Другий перехідний режим роботи сушарки

5. Режим винесення дисперсного матеріалу (рисунок 4.9): витрата сушильного агента $48 \text{ м}^3/\text{год}$, дисперсного матеріалу – $12 \text{ кг}/\text{год}$. Він характеризується збільшенням вертикальної складової і винесенням дисперсного матеріалу товарної фракції з меж контактної полиці без переміщення на наступний ступінь сушарки. В цьому режимі сила висхідного руху сушильного агента значно перевищує суму сил інерції та скочування по похилій поверхні, які обумовлюють поступальний рух дисперсного матеріалу вздовж полиці. Швидкість газу у досліджуваному режимі досягає значення швидкості винесення частинок даного розміру з апарата.



Рисунок 4.9 – Робота сушарки у режимі винесення дисперсного матеріалу

Розглянемо особливості гідродинаміки двофазного потоку при русі його по полиці, в розвантажувальному зазорі, місці вивантаження в умовах зміни конструктивного оформлення полиці [148].

Полідисперсний матеріал після виходу із завантажувального патрубку рухається по першій третині полиці за рахунок інерції, яку він одержав при подачі в робочий простір апарата. При наближенні до центру полиці частинки створюють зва-

жений шар внаслідок зменшення сили інерції та збільшення впливу висхідного потоку сушильного агента на їх рух. При цьому починається процес сепарації дрібних частинок, який продовжується по мірі переміщення частинок по полиці до розвантажувального пристрою.

Значення швидкості газового потоку досягає другої критичної, яка відповідає винесенню частинок заданого розміру з апарата. В зазорі між полицею та стінкою апарата відбувається остаточне відділення дрібної фракції від товарної за рахунок різкого збільшення швидкості руху сушильного агента, обумовленого зменшенням вільного перерізу його проходу. По мірі збільшення витрати сушильного агента сепарація дрібних частинок починається ближче до місця їх введення в апарат внаслідок збільшення ступеню впливу висхідного газового потоку і зменшення сили інерції частинки. Після відділення від дрібної фракції частинки товарного розміру переміщуються на наступний ступень сушарки.

Встановлення полиці під кутом $\gamma = 25^\circ$, меншим, ніж кут природного відкосу матеріалу, який дорівнює $\gamma_0 = 34\text{--}37^\circ$ [149] призводить до того, що частинки переміщуються по полиці нерівномірно, нижні та верхні шари частинок затримуються на поверхні полиці різний час, що призводить до різниці в часі контакту з сушильним агентом та можливого перегріву чи недогріву матеріалу. Рух частинок по полиці відбувається, як за рахунок сил інерції, яку вони одержують на початку полиці (введення матеріалу чи пересипання його на наступну полицю), так і завдяки дії висхідного потоку сушильного агента. При цьому частинки, які одержали більшу інерцію, можуть проскочити поверхню полиці, що зменшує інтенсивність їх контакту з сушильним агентом. Залежно від навантаження по сушильному агенту частинки переміщуються по поверхні полиці з різною швидкістю. При мінімальному навантаженні по сушильному агенту $24,6 \text{ м}^3/\text{год}$ невелика швидкість переміщення може призвести до перегріву і руйнування частинок, що є небажаним. При робочому навантаженні по сушильному агенту $35,4 \text{ м}^3/\text{год}$ (діапазон існування стійкого розвиненого зваженого шару) частинки починають не переміщуватись поверхнею полиці, а виноситись з неї в режимі пневмотранспорту. При такому варіанті встановлення полиці вихроутворення майже відсутнє.

При встановленні полиці в діапазоні кута природного відкосу матеріалу $\gamma = 34\text{--}37^\circ$ рух частинок по довжині полиці становиться рівномірним, спостерігається однорідність перемішування частинок. В цьому випадку висхідний потік сушильного агента сприяє вирівнюванню необхідного часу перебування частинки на полиці. При мінімальному навантаженні по сушильному агенту $24,6 \text{ м}^3/\text{год}$ відбувається поступове переміщення частинки до краю полиці та рівномірний провал на наступну ступінь. При робочому навантаженні по сушильному агенту $35,4 \text{ м}^3/\text{год}$ частинки інтенсивно рухаються в напрямку зони вивантаження, сила їх інерції після надходження на полицю зменшується завдяки дії висхідного потоку сушильного агента, що збільшує час перебування матеріалу на полиці. Інтенсивність вихроутворення на кінці полиці невелика та не чинить значного впливу на рівномірність руху сушильного агента.

По мірі збільшення кута нахилу полиці за діапазон кута природного відкосу (до максимального значення, яке дорівнює $\gamma = \gamma_0 + (15\text{--}17)^\circ$) на полиці відбувається поступове збільшення швидкості руху частинок. При цьому сила інерції частинки все менше компенсується дією висхідного потоку сушильного агента, збільшується вплив сили тяжіння. На полиці внаслідок зменшення часу перебування частинок відбувається нерівномірне і недостатнє їх нагрівання, структура зваженого шару порушується, зміна витрати сушильного агента впливає лише на інтенсивність сепарації дрібної фази. При такому куті нахилу полиці збільшується вихроутворення на її кінці, створюється зона зниженого тиску, що негативно впливає на рівномірність руху сушильного агента.

При значенні зазору між полицею та стінкою апарата в межах $0,5$ довжини апарата і більше, частинки на ній фактично не затримуються, час їх перебування є мінімальним і вони швидко переміщуються на наступний ступінь сушарки. Це пов'язано з тим, що частинки мають початкову силу інерції, надану їм при надходженні на полицю. Цієї сили достатньо, щоб чинити опір тертю о полиці та висхідному потоку сушильного агента. Сушильний агент в такому разі сприяє сепарації дрібних частинок і контактує з матеріалом досить короткий проміжок часу, але за рахунок того, що інтенсивність видалення вологи з матеріалу в початковий момент сушіння найбільша, то сушильний агент повністю виконує свою функцію. Пік шви-

дкості руху потоку сушильного агента в зазорі між кінцем полиці та стінкою апарата має значення, яке дещо перевищує швидкість його руху над перфорованою полицею. Утворення вихрового потоку сушильного агента при огинанні ним кінця полиці майже не спостерігається, що забезпечує постійний перепад тисків ці майже не спостерігається, що забезпечує постійний перепад тисків і рівномірність розподілу епюри швидкості по довжині полиці.

Зменшення зазору до величини 0,25–0,35 довжини апарата (подовження полиці) крім збільшення часу перебування матеріалу в сушарці (за рахунок гальмування частинок з початковою інерцією висхідним потоком сушильного агента) сприяє створенню рівномірного його шару по всій довжині полиці. У цьому випадку під дією сушильного агента проходить не лише сепарація дрібної фракції, але й достатнє за тривалістю нагрівання матеріалу.

Пік швидкості руху потоку сушильного агента в зазорі між кінцем полиці та стінкою апарата збільшується внаслідок зменшення площі його проходу. Утворення вихрів сушильного агента стає більш помітним, що призводить до збільшення перепаду тиску, який дещо знижує швидкість його руху в останній чверті полиці. Таким чином, на полиці утворюється дві зони: зона постійної швидкості і зона спадаючої швидкості руху сушильного агента, різниця між якими незначна.

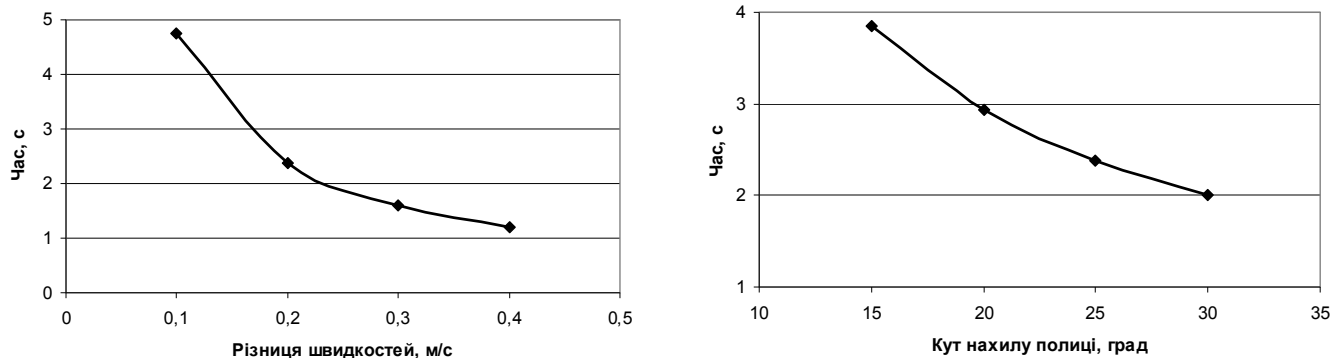
Зменшення зазору до величини 0,15–0,2 довжини апарата крім зазначених вище переваг призводить до недоліку, а саме утворення вихрів в розвантажувальному просторі в районі кінця полиці. Останнє призводить до зменшення перепаду тиску над полицею і під нею. При цьому дві утворені зони на полиці мають більш виражений характер та перепад швидкостей. Уникнути його можливо шляхом зміни перфорації полиць (зміна за довжиною діаметра і числа отворів полиці).

Характер розподілу швидкостей газового потоку на кожному зі ступенів поличної сушарки якісно має один і той же вигляд, а кількісно дещо змінюється при переході на розташований вище ступінь. Зважаючи на постійність витрати сушильного агента в кожному з перерізів сушарки повинна виконуватись умова постійності інтегральної швидкості по площі незмінного перерізу.

По мірі переміщення сушильного агента по висоті сушарки відбувається його поступовий перерозподіл по перерізу міжполичного простору. На кожному розташованому вище ступені створюються умови для рівномірного проходження сушильного агента крізь полиці та в розвантажувальний зазор. При цьому пік швидкості у розвантажувальному зазорі зменшується (максимум піку залишається постійним по поточній координаті ширини апарата), що компенсується збільшенням швидкості сушильного агента над полицею.

В зоні введення сушильного агента та вивантаження гранул за рахунок різкої зміни траєкторії руху газового потоку та наявності полиці дисперсна фаза втягується в обертальний рух в нижній частині сушарки. Інтенсивність вихроутворення тим більша, чим ближче до місця введення газового потоку розташована полиця.

На рисунках 4.10 і 4.11 наведено результати визначення часу перебування частинки поліпропілену ($d_p = 3$ мм, $x = 1,7$ %) на полиці в режимі її одиночного та стисненого руху залежно від кута нахилу полиці та різниці швидкостей відповідно до формул (3.25) і (3.28) при $V = 36,5$ м³/год.

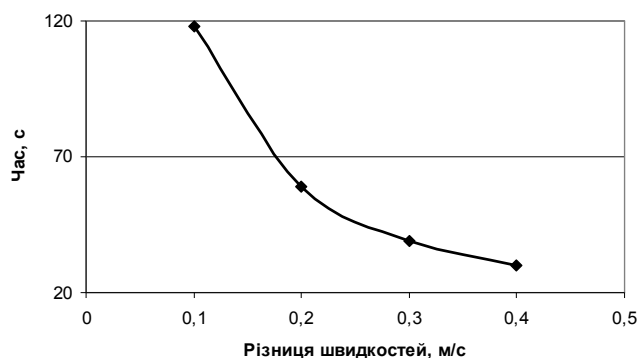


а

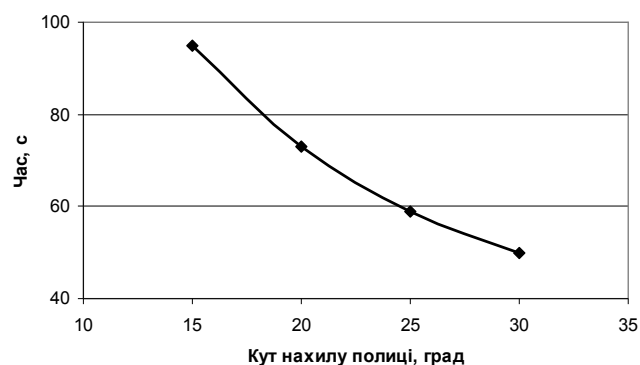
б

Рисунок 4.10 – Час перебування дисперсного матеріалу на полиці з $L_{пол} = 0,12$ м та $\psi = 25$ % (одиночний рух частинки): а – $\gamma = \gamma_0 + (11-13)^\circ$; б – $\Delta W_c = 0,2$ м/с

Одержані результати дозволяють визначити загальний час перебування частинки в робочому просторі сушарки залежно від кількості ступенів контакту з сушильним агентом та конструкції полиці [150].



а



б

Рисунок 4.11 – Час перебування дисперсного матеріалу на полиці з $L_{пол} = 0,12$ м та $\psi = 25$ % (стиснений рух частинок): а – $\gamma = \gamma_0 + (11-13)^\circ$; б – $\Delta W_2 = 0,2$ м/с

4.3 Визначення ефективності видалення вологи з дисперсних матеріалів в багатоступеневій гравітаційній поличній сушарці

Умови проведення експериментальних досліджень: витрата сушильного агента складає $36 \text{ м}^3/\text{год}$ (крім випадків дослідження впливу співвідношення витрат сушильного агента та дисперсного матеріалу на температурно-вологісні характеристики потоків та ефективність) витрата матеріалу – $12 \text{ кг}/\text{год}$. Модельний матеріал – поліпропілен ($d_{ч} = 3-3,5 \text{ мм}$).

4.3.1 Визначення коефіцієнта масовіддачі

Для обчислення кінетичного параметру перенесення вологи B у формулі (3.60) необхідним є експериментальне визначення параметрів, від яких залежить коефіцієнт масовіддачі (коефіцієнт вологовіддачі) β .

Запропоновано [151] застосовувати для обчислення β рівняння вигляду:

$$\frac{\Delta U_{.m}}{\tau_{пер}} = \beta \cdot F \cdot \left(b_{к} - \frac{b_{к} + b_0}{2} \right) \cdot \rho_2, \quad (4.1)$$

де b_0 , $b_{к}$, $\Delta U_{.m}$ – початкова та кінцева вологість сушильного агента, кількість видаленої вологи з матеріалу відповідно (розділ 4.3.2); F – поверхня масопередачі, яка залежить від продуктивності сушарки за дисперсним матеріалом і часу перебування

матеріалу в сушарці. Час перебування матеріалу в сушарці визначається з розділу 4.2.2.

Розраховані значення коефіцієнта масовіддачі β з рівняння (4.1) залежно від швидкості руху сушильного агента показано на рисунку 4.12.

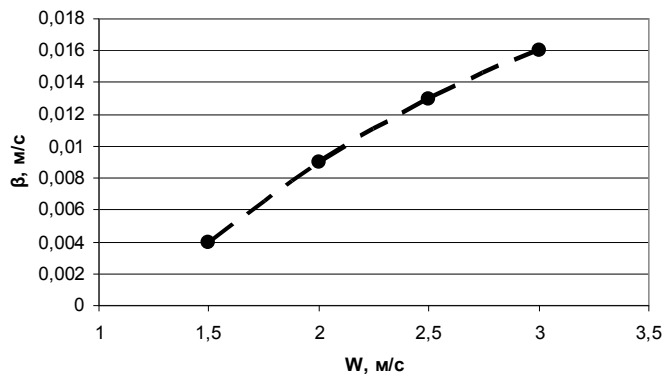


Рисунок 4.12 – Залежність коефіцієнта масовіддачі від швидкості руху сушильного агента

У загальному вигляді критеріальне рівняння процесу сушіння можна записати наступним чином:

$$Sh = A_1 \cdot Sc^n \cdot Re^m, \quad (4.2)$$

де A_1 – коефіцієнт рівняння; $Sh = \frac{\beta \cdot d_+^a}{D}$ – критерій Шервуда; d_+^e – еквівалентний діаметр частинки; $Sc = \frac{\nu}{D}$ – критерій Шмідта; m, n – показники ступенів рівняння, які визначаються з графічної залежності $Sh / Sc^{0,33} = f(Re)$, отриманої на основі експериментальних даних (рисунок 4.13).

З графічної залежності (рисунок 4.13) коефіцієнт $A_1 = 0,008$, $m = 0,47$. Значення коефіцієнта n дорівнює 0,33 для випадку, коли параметри сушильного агента змінювались упродовж експерименту незначно [151].

З урахуванням отриманих значень коефіцієнта A_1 та ступеня m критеріальне рівняння (4.2) буде мати вигляд:

$$Sh = 0,008 \cdot Sc^{0,33} \cdot Re^{0,47} \quad (4.3)$$

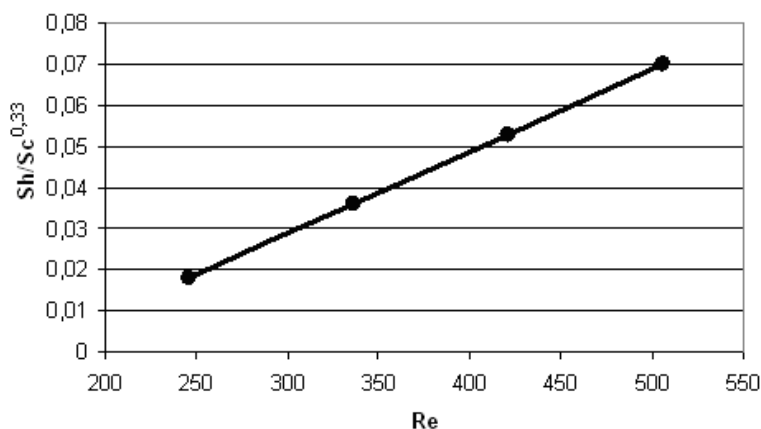


Рисунок 4.13 – Графічна залежність $Sh/Sc^{0,33} = f(Re)$ для визначення коефіцієнта A_1 та ступеня m .

4.3.2 Визначення ефективності процесу сушіння

Для визначення максимальної ефективності процесу на кожному зі ступенів гравітаційної поличної сушарки в експериментальному стенді створені такі умови, при яких сушіння проводилось до моменту відсутності зміни вологості дисперсного матеріалу. Відповідно до формули (3.64) можливо досягти одиниці в чисельнику при нескінченному часі перебування матеріалу на ступені. В такому разі в експериментальному стенді полиця встановлювалась горизонтально без розвантажувального зазору і проводився забір навіски дисперсного матеріалу з визначенням його вологості.

Враховуючи теоретичні викладення і те, що на кожному зі ступенів властивості сушильного агента є різними (вологість та температура), при постійному співвідношенні потоків дисперсного матеріалу і сушильного агента у формулі (3.64) змінюється лише чисельник. Тому доцільним є визначення відносної ефективності процесу при постійному співвідношенні потоків.

Результати обрахунку максимальної різниці вологостей матеріалу, які на кожному ступені сушарки відповідають максимальній ефективності, наведено в таблиці 4.1.

Відповідно до порядку проведення експерименту досліджено вплив на ефективність таких конструктивних характеристик гравітаційної поличної сушарки:

- кут нахилу полиці до горизонту (γ);

- зазор між кінцем полиці та стінкою сушарки (розвантажувальний зазор) (X/L);
- площа вільного перерізу полиці (ψ);
- діаметр отворів перфорації в полиці ($d_{отв}$).

Таблиця 4.1 – Максимальна різниця вологостей матеріалу (поліпропілен), яка відповідає максимальній ефективності ступеню сушарки

Номер ступеню (по ходу матеріалу)	Максимальна різниця вологостей Δx , мас. долі
1	0,083
2	0,076
3	0,069

Експериментальні дослідження проводились при зміні одного з параметрів, який досліджується, зі збереженням значення інших параметрів ($\gamma = \gamma_0 + (3-5)^\circ$; $X/L = 0,3$; $\psi = 20\%$; $d_{відн} = d_{отв}$ ($d_{відн}$ – діаметр, віднесений до фіксованого діаметра отворів поличного контакту $d_{отв}$); $G_{суш}/G_m = 2$, $x_{поч} = 13\%$). Відповідно до експериментальних досліджень значення кінцевої вологості матеріалу $x_{кін}$ залежить від технологічних і конструктивних характеристик сушарки та коливається від 5 до 8 %.

Також встановлено закон зміни вологості та температури дисперсного матеріалу і сушильного агента на ступенях каскаду полиць залежно від початкової температури сушильного агента, організації його руху та співвідношення витрат сушильного агента і дисперсного матеріалу.

Результати досліджень по кожній конструктивній характеристиці гравітаційної поличної сушарки, температурі сушильного агента і інших показників представлені у вигляді графічних залежностей, що відображають зміну вологості і температури дисперсного матеріалу та сушильного агента. За результатами порівняння експериментально одержаних значень вологості дисперсного матеріалу на кожному ступені сушарки з даними таблиці 4.1 побудовано графічні залежності, які відображають ефективність ступенів залежно від конструкції апарата.

Проаналізуємо вплив зміни кожного конструктивного елемента поличної сушарки на характер зміни параметрів дисперсного матеріалу та сушильного агента [152].

Зміна кута нахилу полиці до горизонту впливає на перерозподіл складових сили тяжіння: збільшення його призводить до збільшення скочуючої складової сили тяжіння і навпаки. При цьому необхідно враховувати, що кут нахилу полиці може мати мінімальне значення, яке відповідає куту природного відкосу матеріалу. Цей випадок було розглянуто, але внаслідок того, що в такому разі відбувалось руйнування матеріалу внаслідок перегріву, розрахунок ефективності не проводився. При такому значенні кута нахилу матеріал висушувався з ефективністю, яка наближалась до одиниці, але його руйнування не дає можливості для застосування в якості товарного продукту.

При зменшенні кута нахилу полиці у вказаному на графічних залежностях діапазоні час перебування дисперсного матеріалу поступово збільшується, що призводить до більш тривалого його контакту з потоком сушильного агента. Внаслідок цього відбувається більш повне видалення вологи з матеріалу і крутизна кривої, яка показує зміну вологи в ньому, збільшується зі зменшенням кута нахилу полиці (рисунки 4.14, 4.15), відповідно, збільшується крутизна кривої, яка показує зміну вологи сушильного агента по ступеням сушарки (рисунки 4.16, 4.17). Внаслідок збільшення часу контакту з сушильним агентом зменшення його температури і збільшення температури матеріалу відбувається інтенсивніше (рисунки 4.16, 4.17).

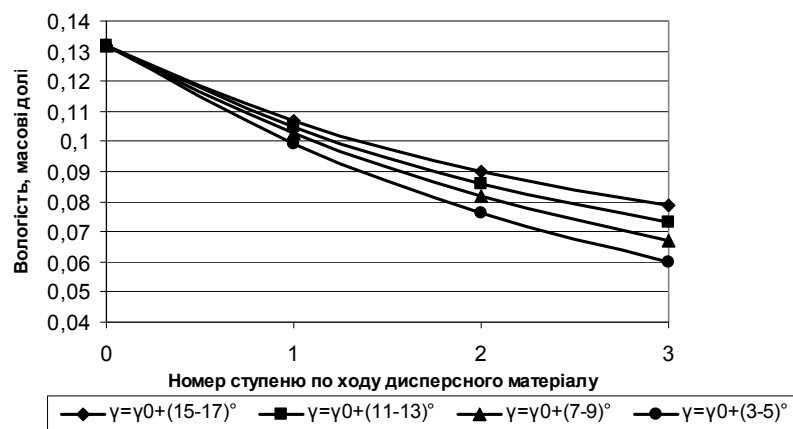


Рисунок 4.14 – Вплив кута нахилу полиці на зміну вмісту вологи в дисперсному матеріалі ($X/L = 0,3$; $\psi = 20\%$; $d_{відн} = d_{омв}$; $G_{сул}/G_m = 2$)

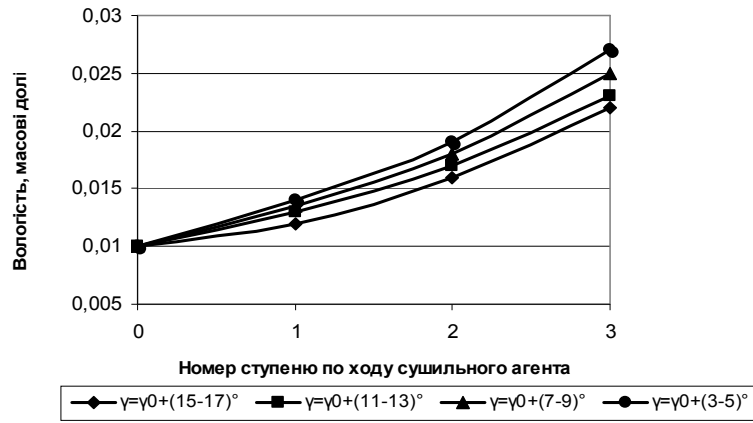


Рисунок 4.15 – Вплив кута нахилу полиці на зміну вмісту вологи у сушильному агенті ($X/L = 0,3$; $\psi = 20 \%$; $d_{відн} = d_{отв}$; $G_{сул}/G_M = 2$)

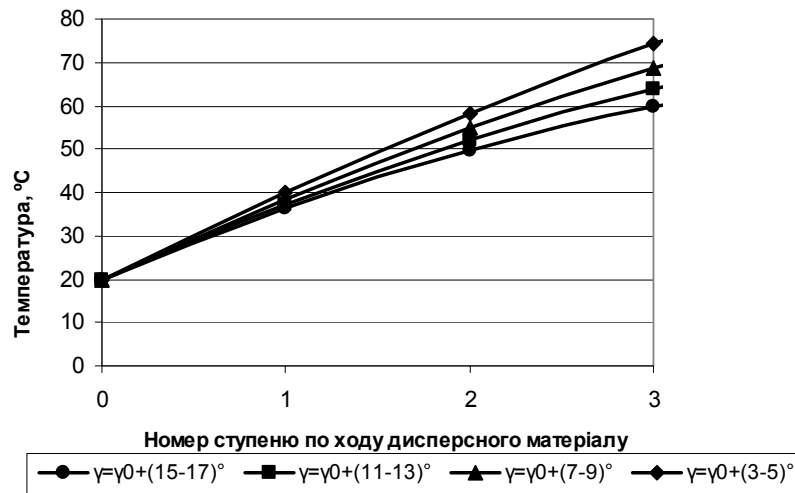


Рисунок 4.16 – Вплив кута нахилу полиці на зміну температури дисперсного матеріалу ($X/L = 0,3$; $\psi = 20 \%$; $d_{відн} = d_{отв}$; $G_{сул}/G_M = 2$)

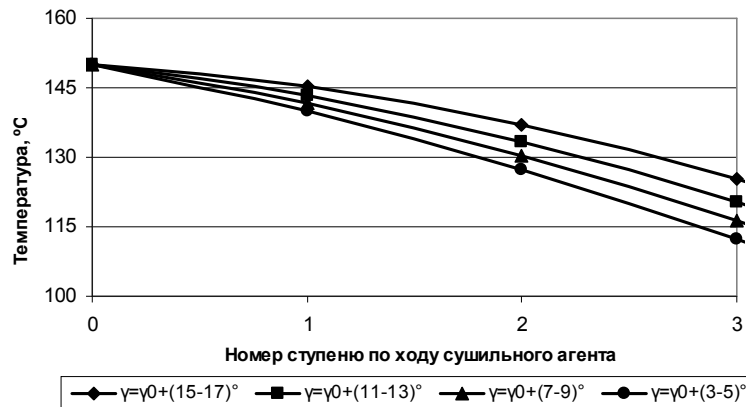


Рисунок 4.17 – Вплив кута нахилу полиці на зміну температури сушильного агента ($X/L = 0,3$; $\psi = 20 \%$; $d_{відн} = d_{отв}$; $G_{сул}/G_M = 2$)

Загальна ефективність ступенів при зміні кута нахилу полиці відносно кута природного відкосу матеріалу, одержана за результатами аналізу даних зміни вологості дисперсного матеріалу, наведена на рисунку 4.18.

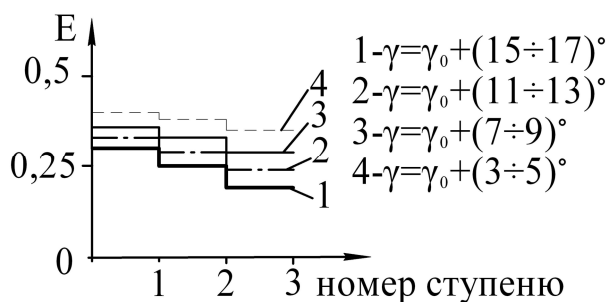


Рисунок 4.18 – Вплив кута нахилу полиці на ефективність процесу сушіння

$$(X/L = 0,3; \psi = 20 \% ; d_{відн} = d_{омв} ; G_{суш}/G_M = 2)$$

нів сушарки зі різних початкових умов (конструкція сушарки, характеристики сушильного агента та організація його руху).

Зміна величини зазору між краєм полиці та стінкою сушарки більш істотно впливає на зміну характеристик потоків та ефективності ступенів. Збільшення зазору призводить до того, що час контакту дисперсного матеріалу з сушильним агентом скорочується внаслідок зменшення довжини відстані руху матеріалу по полиці. В цьому разі дія скочуючої складової швидкості руху дисперсного матеріалу триває

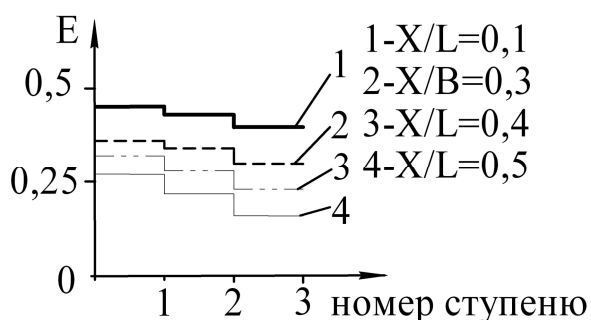


Рисунок 4.19 – Вплив зазору між краєм полиці та стінкою сушарки на ефективність процесу сушіння ($\gamma = \gamma_0 + (3-5)^\circ$;

$$\psi = 20 \% ; d_{відн} = d_{омв} ; G_{суш}/G_M = 2)$$

Температурно-вологісні характеристики дисперсного матеріалу та сушильного агента змінюються за одним законом, але з різною інтенсивністю. Зважаючи на те, що цільовою функцією є кількість видаленої вологи і, як наслідок, ефективність ступенів сушарки, в подальшому представлення результатів експериментальних досліджень обмежимо лише характером зміни ефективності ступенів

менший проміжок часу та в кінці полиці змінюється дією повної сили тяжіння. Таким чином, матеріал переміщується вниз і лише сила дії висхідного газового потоку чинить опір її падінню. Ефективність ступенів сушарки з урахуванням цього зменшується більш стрімко (рисунки 4.18, 4.19).

Аналіз результатів експериментальних досліджень стосовно впливу величини площі вільного перерізу полиці на

ефективність процесу сушіння показав наступне. В рамках обраного діапазону площ вільного перерізу, які забезпечують витання дисперсного матеріалу без його винесення з меж полиці висхідним потоком сушильного агента, спостерігається стійка тенденція до збільшення ефективності при зменшенні цього параметру (рисунок 4.20).

Це пояснюється тим, що зменшення площі вільного перерізу полиці призводить до збільшення швидкості висхідного руху сушильного агента в отворах. В такому випадку дія висхідного потоку сушильного агента пригальмовує поступальний рух дисперсного матеріалу на полиці, компенсуючи скочуючу складову його сили тяжіння. При цьому поступальна складова переміщення дисперсного матеріалу зменшується і траєкторія змінюється на поступально-пульсаційну. Довжина траєкторії руху дисперсного матеріалу збільшується, час його контакту з сушильним агентом подовжується, що стає причиною підвищення ефективності каскаду ступенів гравітаційної полицної сушарки. Результати експериментальних досліджень відносно впливу діаметра отворів перфорації при постійній площі вільного перерізу полиці на ефективність процесу сушіння продемонстровано на рисунку 4.21. Аналіз даних експерименту показав, що зі зменшенням діаметру отворів перфорації ефективність видалення вологи дещо збільшується. Це можна пояснити тим, що в такому випадку відбувається збільшення впливу сили дії висхідного потоку сушильного агента, при якій поступальна складова траєкторії руху дисперсного матеріалу зменшується, а пульсаційна – збільшується.

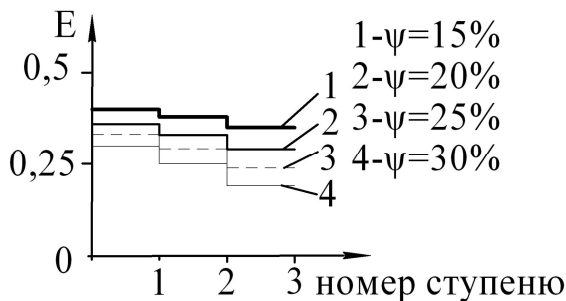


Рисунок 4.20 – Вплив площі вільного перерізу полиці на ефективність процесу сушіння ($\gamma = \gamma_0 + (3-5)^\circ$; $X/L = 0,3$; $d_{відн} = d_{отв}$; $G_{суш}/G_m = 2$)

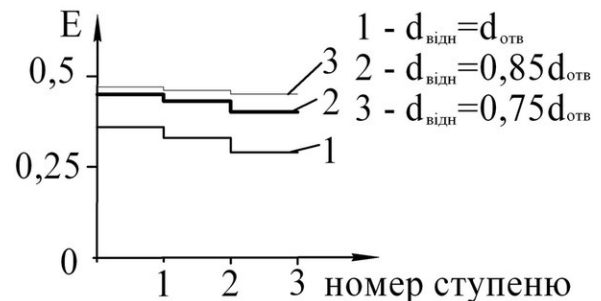


Рисунок 4.21 – Вплив діаметра отворів перфорації полиці на ефективність процесу сушіння ($\gamma = \gamma_0 + (3-5)^\circ$; $X/L = 0,3$; $\psi = 20\%$; $G_{суш}/G_m = 2$)

Таким чином, довжина траєкторії руху дисперсного матеріалу збільшується і час контакту з сушильним агентом подовжується. Слід зазначити, що при подальшому зменшенні діаметру отворів перфорації дія висхідного потоку сушильного агента починає значно переважати дію скочуючої складової сили тяжіння. Це призводить до утворення другого перехідного режиму та режиму винесення в роботі поличної сушарки (див. підрозділ 4.2.2).

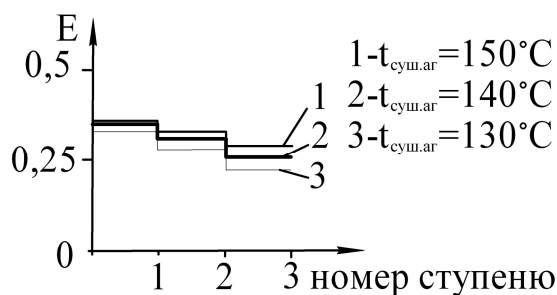


Рисунок 4.22 – Вплив початкової температури сушильного агента на ефективність процесу сушіння ($\gamma = \gamma_0 + (3 - 5)^\circ$; $X/L = 0,3$; $\psi = 20 \%$; $d_{відн} = d_{омв}$; $G_{суш}/G_m = 2$)

Початкова температура сушильного агента не чинить великого впливу на зміну його показників та інтенсивність видалення вологи з дисперсного матеріалу (рисунок 4.22). Це можна пояснити тим, що сушильний агент вводиться під нижній ступінь сушарки, на якому з дисперсного матеріалу вже видалено поверхневу вологу і лімітуючою стадією процесу є лише час перебування дисперсного матеріалу на ступені.

Організація руху сушильного агента та співвідношення витрати сушильного агента до витрати дисперсного матеріалу, який піддається зневодненню, може істотно впливати на показники якості висушеного матеріалу та властивості сушильного агента. З цією метою проведено ряд експериментальних досліджень, результати яких відображено на рисунках 4.23–4.26. Їх аналіз дозволяє провести підбір способу організації руху сушильного агента, який буде найменш енергоємним та забезпечить необхідну повноту видалення вологи з дисперсного матеріалу.

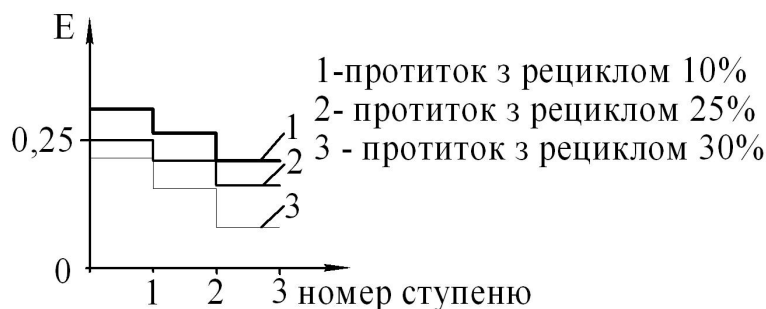


Рисунок 4.23 – Вплив способу рециркуляції сушильного агента на ефективність процесу сушіння ($\gamma = \gamma_0 + (3 - 5)^\circ$; $X/L = 0,3$; $\psi = 20 \%$; $d_{відн} = d_{омв}$; $G_{суш}/G_m = 2$)

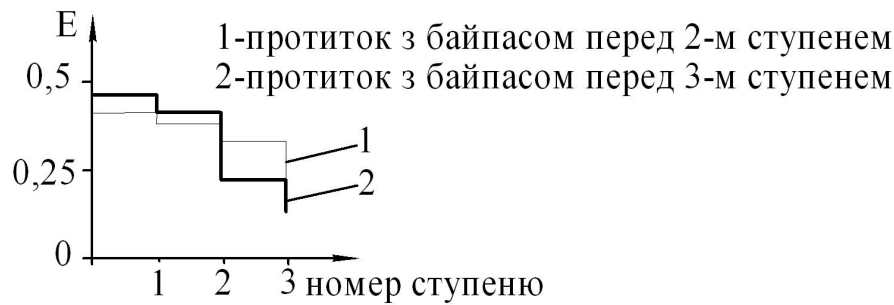


Рисунок 4.24 – Вплив способу байпасування сушильного агента на ефективність процесу сушіння ($\gamma = \gamma_0 + (3-5)^\circ$; $X/L = 0,3$; $\psi = 20\%$; $d_{відн} = d_{отв}$; $G_{суш}/G_M = 2$)

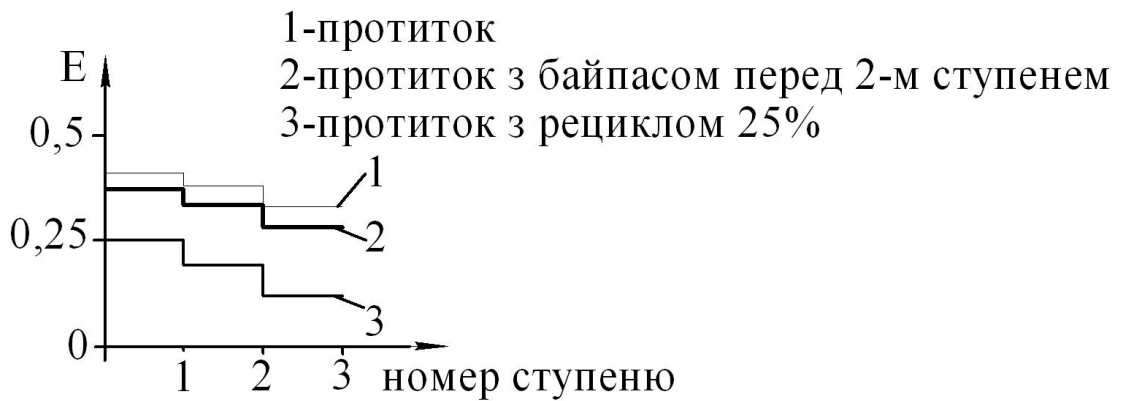


Рисунок 4.25 – Вплив організації руху сушильного агента на ефективність процесу сушіння ($\gamma = \gamma_0 + (3-5)^\circ$; $X/L = 0,3$; $\psi = 20\%$; $d_{відн} = d_{отв}$; $G_{суш}/G_M = 2$)

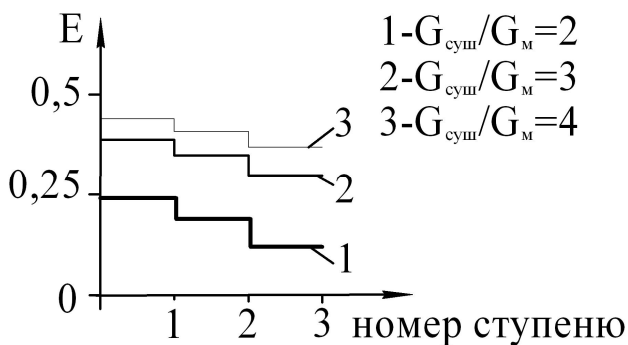


Рисунок 4.26 – Вплив співвідношення витрат сушильного агента та дисперсного матеріалу на ефективність процесу сушіння ($\gamma = \gamma_0 + (3-5)^\circ$; $X/L = 0,3$; $\psi = 20\%$; $d_{відн} = d_{отв}$)

Аналіз наведених рисунків 4.14–4.26 показує, що зміна характеристик дисперсного матеріалу та сушильного агента відбувається за одним законом; при цьому кожна з конструктивних характеристик поличної сушарки та технологічних показників сушильного агента по-різному впливає на інтенсивність збільшення або зменшення параметрів. З рисунків видно, що екстремум функції на графічних залежностях відсутній, що пояснюється закономірностями кінетики

конвективного сушіння – зміна параметрів контактуючих потоків у кожному з періодів відбувається монотонно з різною інтенсивністю на окремих ділянках залежно від умов проведення зневоднення.

4.4 Висновки до четвертого розділу

1. Встановлено вплив конструкції полиці та організації руху сушильного агента на гідродинамічні характеристики роботи гравітаційної поличної сушарки і час перебування дисперсного матеріалу в об'ємі апарата.

2. За результатами експериментальних досліджень встановлена нерівномірність поля швидкостей сушильного агента в надполичному просторі, яка обумовлена втратами напору по довжині полиці та місцевими опорами, а також вихроутворенням в розвантажувальному зазорі. Збільшення зазору та зменшення кута нахилу полиці призводить до вирівнювання поля швидкості сушильного агента в надполичному просторі.

3. Визначено три основних (режим гравітаційного падаючого шару, режим зваженого шару, режим винесення дисперсного матеріалу) та два перехідних режими роботи сушарки в залежності від навантаження по потокам та часу перебування дисперсної фази в апараті при кожному з режимів. В режимі зваженого шару, який визначено найбільш ефективним для сушіння, час перебування матеріалу на полиці при його стисненому русі за різних умов проведення експерименту складає від 25 до 120 с.

4. Отримано критеріальну залежність (4.3), яка дозволяє прогнозувати значення коефіцієнту масовіддачі при сушінні в гравітаційних поличних сушарках. Встановлено, що основний вплив на коефіцієнт масовіддачі чинять гідродинамічний режим роботи апарата і вологісні характеристики сушильного агента.

5. Отримано температурно-вологісні характеристики взаємодіючих потоків та значення ефективності ступенів сушарки в залежності від конструкції полиць та організації руху сушильного агента. Показано, що найбільший вплив на зміну температурно-вологісних характеристик чинить час перебування матеріалу на ступені,

який обумовлено кутом нахилу полиць і їх довжиною.

6. За різних умов проведення експерименту визначено діапазон ефективностей окремих ступенів сушарки в межах 0,12–0,47. При цьому кількість видаленої вологи з матеріалу може становити від 4 до 8 % мас. При початковому значенні вологості дисперсного матеріалу 13 % мас.

7. Показано, що за рахунок зміни конструкції полиці та організації руху сушильного агента (зокрема, у випадку його байпасування) можливо управляти часом сушіння матеріалу та ефективністю ступенів сушарки. Кут нахилу полиці може мати мінімальне значення, яке відповідає куту природного відкосу матеріалу.

Основні положення розділу опубліковані в працях [93,145,146,148,150,152].

РОЗДІЛ 5

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Аналіз і порівняння результатів теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень

В даному розділі наведено порівняльні графічні залежності, які одержані за даними теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень. Аналіз закону гідродинамічних характеристик сушильного агента, вологості і температури потоків, обчислених теоретично та одержаних за даними експериментальних досліджень, показав, що за різних початкових умов в характері теоретичних та експериментальних кривих простежується одна і та ж якісна закономірність, але кількісна характеристика дещо не збігається. Значення гідродинамічних та кінетичних характеристик, отриманих за результатами аналітичного розв'язання, та експериментальні дані мають високий ступінь відповідності. Відмінність в кількісній характеристиці для всіх випадків пояснюється ідентичними причинами, тому аналіз та зіставлення одержаних результатів буде проводитись при дослідженні впливу зміни довільно обраного параметра.

5.1.1 Гідродинаміка руху потоків

Зіставлення результатів математичного моделювання та експериментальних досліджень закону зміни швидкості руху сушильного агента в надполичному просторі для випадку зміни кута нахилу полиці показано на рисунку 5.1.

Аналіз даних рисунка показав, що зміна швидкості сушильного агента за довжиною полиці відбувається монотонно, але інтенсивність зниження за даними експериментальних досліджень дещо вища. Це пояснюється виникненням на кінці полиці зон вихрового руху сушильного агента внаслідок огинання полиці, а також зниженням тиску в об'ємі поличної сушарки в зоні огинання сушильним агентом кінці полиці. Явище підтверджено результатами комп'ютерного моделювання (рисунок 5.2). Відсутність такого різ-

кого спаду швидкості при теоретичному розрахунку пов'язане з застосуванням аналітичного методу, який не враховує вихроутворення.

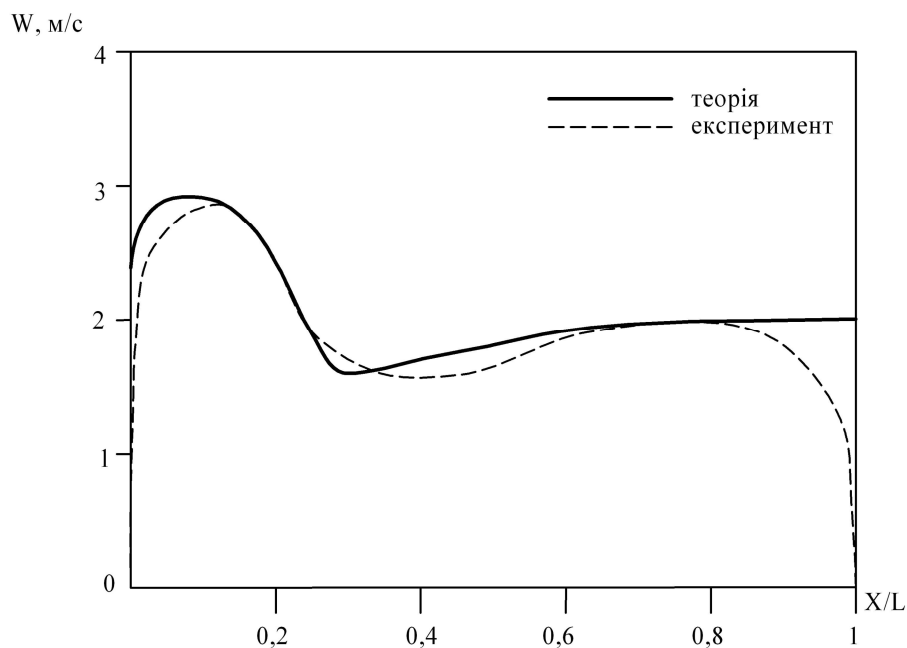


Рисунок 5.1 – Епюра розподілення швидкості руху газового потоку по довжині апарата при $X/L = 0,15$, $\gamma = \gamma_0 + (7-9)^\circ$, $H = 0,25$ м

В основі теоретичного розрахунку гідродинаміки руху сушильного агента лежать класичні рівняння гідродинаміки (розділ 3). Оскільки, в загальному випадку, ці рівняння нелінійні і не мають аналітичного рішення без введення спрощень та допущень, то для здійснення моделювання вирішувати їх можливо чисельно, знаходячи замість безперервного рішення дискретний набір його значень в певних точках (або осередках) простору і для певних моментів часу (якщо вирішуються нестационарні рівняння, тобто з плином часу, як однією з незалежних змінних). При цьому, виходячи з міркувань досягнення можливої максимальної точності рішення, вибирається також спосіб представлення цих дискретних значень у відповідних цій дискретизації аналогах алгебраїчних рівнянь. В результаті, математичне завдання вирішення системи диференціальних або інтегральних рівнянь зводиться до математичного завдання вирішення системи алгебраїчних рівнянь (зазвичай нелінійних) [153].

Відповідно, метод дискретизації безперервного рішення, перетворення рівнянь в алгебраїчні і вирішення отриманої системи алгебраїчних рівнянь є методом вирішення математичної задачі, поставленої в математичній моделі даних фізичних

процесів. У даній роботі моделювання проводиться з використанням методу кінцевих об'ємів.

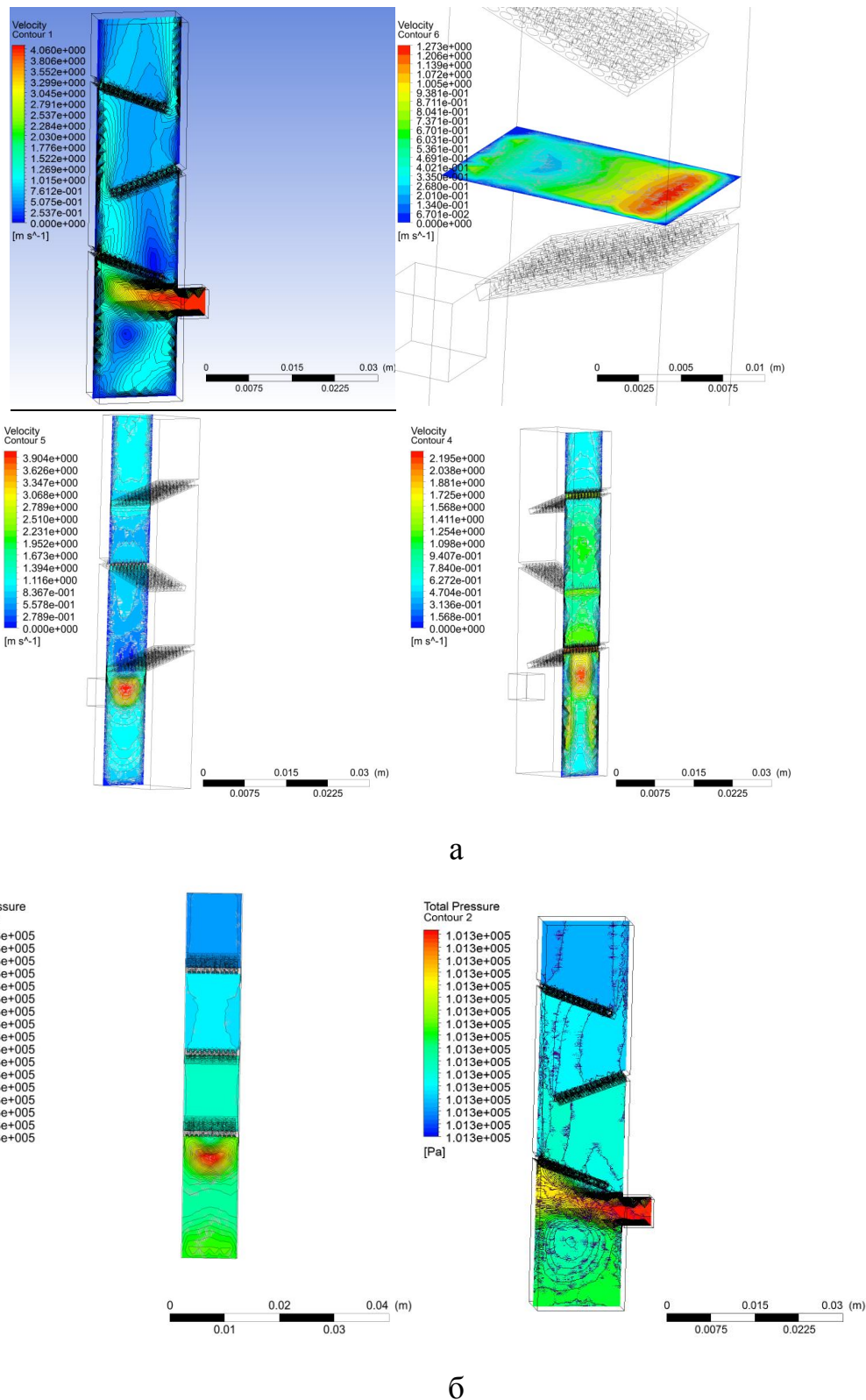


Рисунок 5.2 – Результати комп'ютерного моделювання (програмний продукт ANSYS): а – заливка полів швидкості газового потоку; б – заливка полів тиску газового потоку

Результати досліджень і комп'ютерного моделювання дозволяють встановити характерні особливості руху дисперсного матеріалу в робочому просторі апарата, виявити наявність областей зниженої швидкості, інтенсивного вихроутворення, сепарації і т.д. Такий підхід до вивчення гідродинаміки руху потоків дозволяє виявити конструктивні недоліки сушарок і усунути їх на стадії проектування дослідного зразка, що скорочує собівартість промислової апаратури [154].

Зниження швидкості руху сушильного агента по довжині полиці негативно впливає на можливість управління рухом дисперсних частинок в сушарці, тому в підрозділі 5.3 запропоновано методи конструктивного вдосконалення полицьних сушарок з метою вирівнювання поля швидкості сушильного агента в надполичному просторі.

Зіставлення результатів теоретичного розрахунку часу перебування частинки на полиці в режимі стисненого руху залежно від кута нахилу полиці і різниці швидкостей (формула (3.28)) та експериментального визначення цього показника дає задовільний результат (рисунок 5.3).

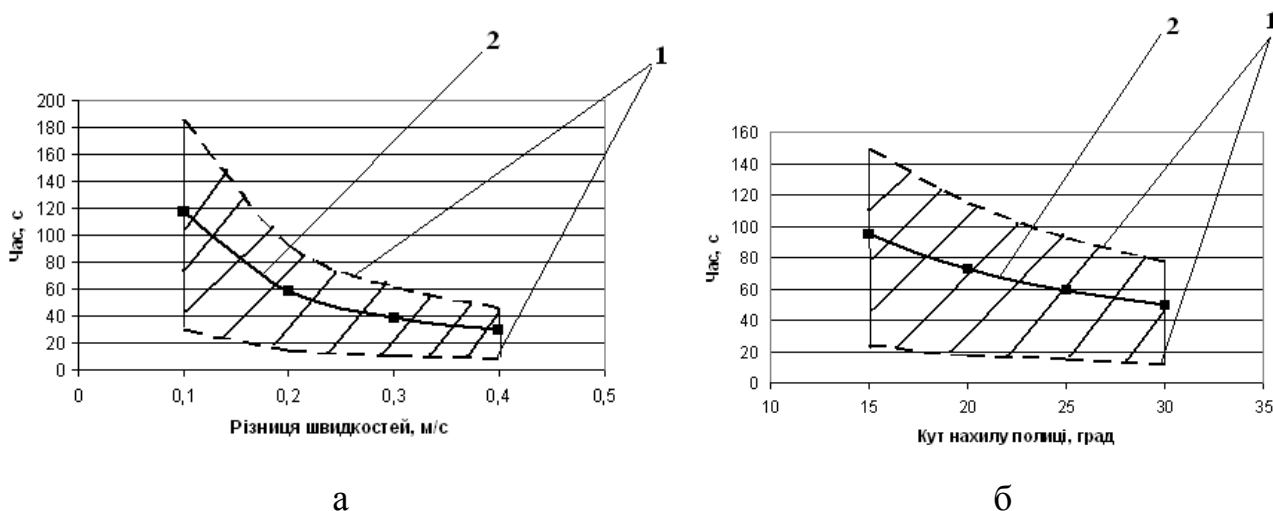


Рисунок 5.3 – Час перебування дисперсного матеріалу на полиці довжиною $L_{\text{пол}} = 0,12$ м (стиснений рух частинок): а – $\gamma = \gamma_0 + (11-13)^\circ$; б – $\Delta W_z = 0,2$ м/с; 1 – діапазон теоретичного розрахунку; 2 – експериментальні дані

На рисунку 5.4 наведено дані експериментальних досліджень часу перебування дисперсної частинки на полиці в режимі стисненого руху з огляду на режим роботи гравітаційної полицьної сушарки. Результати досліджень свідчать про різке зростання часу перебування дисперсної частинки на полиці при переході до режиму

зваженого шару (зона III) та наближення до нуля часу перебування частинки на полиці при досягненні сушильним агентом другої критичної швидкості (винесення частинок зі зваженого шару, зона V).

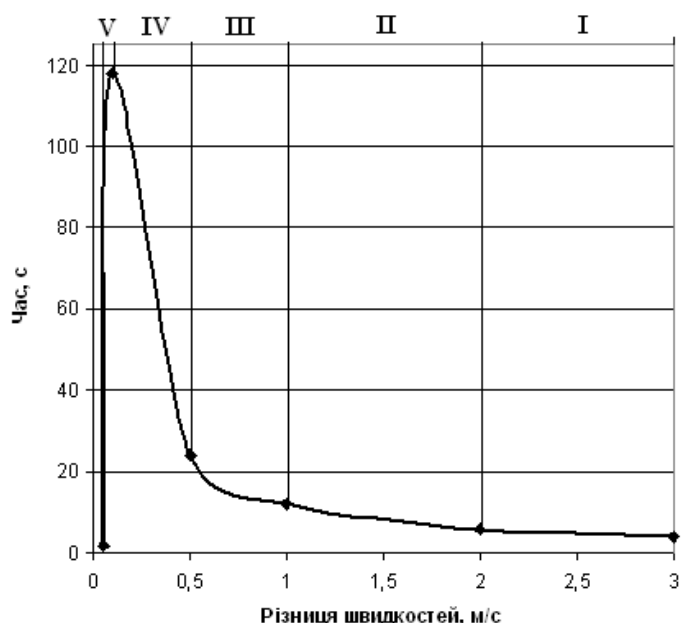


Рисунок 5.4 – Дані експериментальних досліджень часу перебування дисперсної частинки на полиці в режимі стисненого руху; режими: I – режим гравітаційного падаючого шару; II – перший перехідний режим; III – режим зваженого шару; IV – другий перехідний режим; V – режим винесення дисперсного матеріалу

5.1.2 Ефективність роботи ступенів поличної сушарки

Зіставлення результатів математичного моделювання та експериментальних досліджень показало, що інтенсивність зневоднення дисперсного матеріалу (зволоження сушильного агента) та його нагрівання (охолодження сушильного агента) вища у випадку теоретичного розрахунку. Це обумовлено такими чинниками:

- втрати тепла крізь теплоізоляцію поличної сушарки;
- відмінність експериментальних полів швидкості сушильного агента на окремих полицях каскаду при їх однаковому конструктивному виконанні.

Порівняння даних теоретичного розрахунку та експериментальних досліджень стосовно ефективності ступенів сушарки на прикладі впливу кута нахилу полиці представлено на рисунку 5.5.



Рисунок 5.5 – Вплив кута нахилу полиці на ефективність процесу сушіння

($\gamma = \gamma_0 + (15-17)^\circ$, $X/L = 0,3$; $\psi = 20\%$;

$$d_{\text{відн}} = d_{\text{отв}}; G_{\text{суш}}/G_{\text{м}} = 2)$$

Аналіз результатів опису гідродинаміки одно- та двофазного потоків, а також закону зміни температури і вологості взаємодіючих потоків дозволив відпрацювати наступний алгоритм обчислення необхідного часу перебування дисперсних частинок в межах гравітаційної полицної сушарки:

1. Визначення необхідного часу сушіння частинки по формулі (3.17).

2. Визначення гідродинамічного часу перебування частинки в полицній сушарці $\Sigma\tau_i$, де τ_i обчислюється по формулі (3.28).

3. Корегування (за необхідності) часу перебування частинки в полицній сушарці шляхом зміни параметрів $L_{\text{пол}}$, γ (конструкція полиці), ΔW_a (витрата сушильного агента, організація його руху, співвідношення між витратою сушильного агента та дисперсного матеріалу).

Результати аналізу даних математичного моделювання та експериментальних досліджень дозволили побудувати криву сушіння для модельного матеріалу (рисунок 5.6).

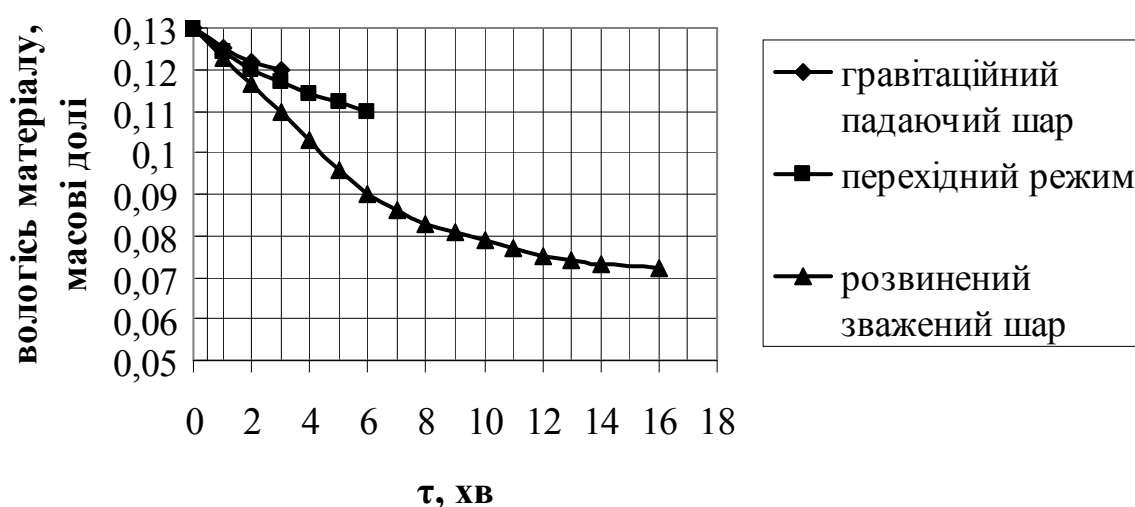


Рисунок 5.6 – Крива сушіння поліпропілену: $t_{\text{суш}} = 140^\circ\text{C}$; $L_{\text{пол}} = 0,12$ м;

$$\gamma = \gamma_0 + (11-13)^\circ; \psi = 25\%; X/L = 0,3; d_{\text{відн}} = d_{\text{отв}}$$

Аналіз кривих, побудованих для різних гідродинамічних режимів роботи сушарки, дозволяє виділити періоди постійної та падаючої швидкості сушіння, які відрізняються характером кривих та розділені критичною точкою.

Подібні криві стає можливим побудувати за інших конструктивних характеристик сушарки. За результатами побудови таких кривих можна визначити оптимальне конструктивне виконання сушарки.

5.2 Розроблення нових конструкцій поличних сушарок

Завдяки можливості обладнання гравітаційної сушарки різними типами поличних контактів процес видалення вологи на кожному зі ступенів може проходити з різною інтенсивністю та тривалістю у часі.

Вдосконалення конструкції поличних контактів є актуальним завданням з огляду на можливість підвищення ефективності видалення вологи на кожному зі ступенів гравітаційної сушарки. Експериментально встановлено, що ефективність видалення вологи із дисперсного матеріалу на кожному зі ступенів є різною. Крім того, відбувається зменшення цього показника на кожному нижче розташованому поличному контакті. Для підвищення показника ефективності сушіння та вирівнювання його значення на всіх поличних контактах необхідним є вдосконалення конструкції ступенів сушарки.

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень (розділи 3,4) встановлено, що в загальному випадку епіюра швидкості руху сушильного агента над полицею по довжині гравітаційної сушарки має вигляд, зображений на рисунку 5.7. Слід виділити три характерні зони швидкості руху сушильного агента [155]:

- зона I – рівномірне розподілення швидкості руху сушильного агента (деяке зниження швидкості обумовлене опором тертя по довжині полиці);
- зона II – інтенсивне зниження швидкості руху сушильного агента;
- зона III – підвищення швидкості руху сушильного агента в розвантажувальному зазорі.

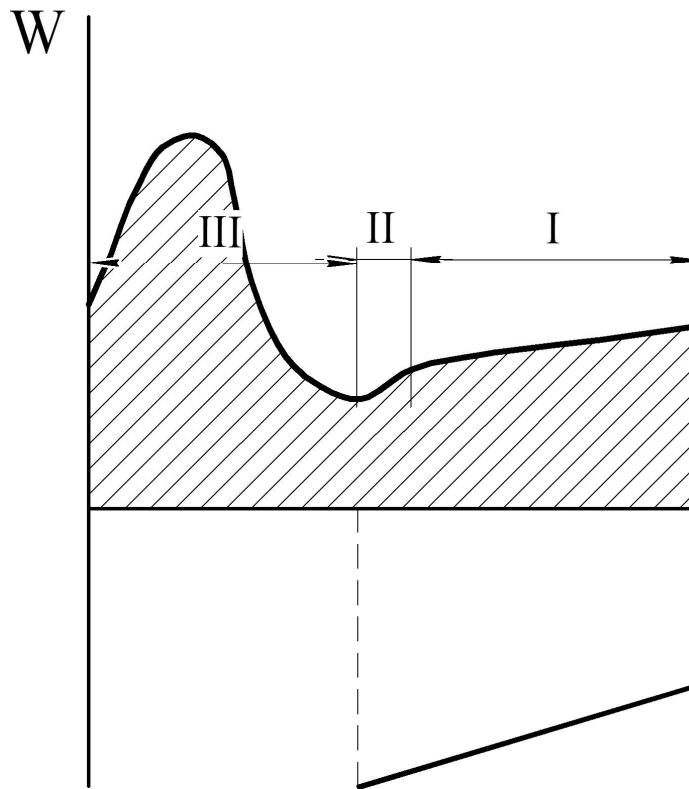


Рисунок 5.7 – Епюра розподілення швидкості руху сушильного агента над полицею в гравітаційній сушарці

В зоні I та II дисперсний матеріал знаходиться у зваженому стані, але, враховуючи нерівномірність розподілення швидкості в зоні II, по довжині полиці зважений шар має нерівномірну структуру. Такий гідродинамічний стан призводить до того, що час перебування дисперсного матеріалу на полиці може значно коливатись. Наслідком цього може бути як недогрівання матеріалу, так і його перегрівання з наступним руйнуванням (в разі зневоднення термолабільних матеріалів).

В основу розроблених конструктивних рішень [156–158] поставлено завдання удосконалення пристрою для сушіння дисперсних матеріалів шляхом зміни конструкції контактних полиць, що забезпечує збільшення рівномірності контакту сушильного агента з потоком дисперсного матеріалу та створення покращеної гідродинаміки руху потоків з метою збільшення часу контакту дисперсного матеріалу з сушильним агентом.

Запропоновано наступні вдосконалення конструкції ступенів сушарки:

– встановлення поличних контактів з різним розвантажувальним зазором по

висоті сушарки (рисунок 5.8 а);

- використання поличного контакту зі змінною перфорацією (рисунок 5.8 б);
- виконання збірного поличного контакту, кожна з частин якого має різний кут нахилу до горизонту (рисунок 5.8 в).

кут нахилу до горизонту (рисунок 5.8 в).

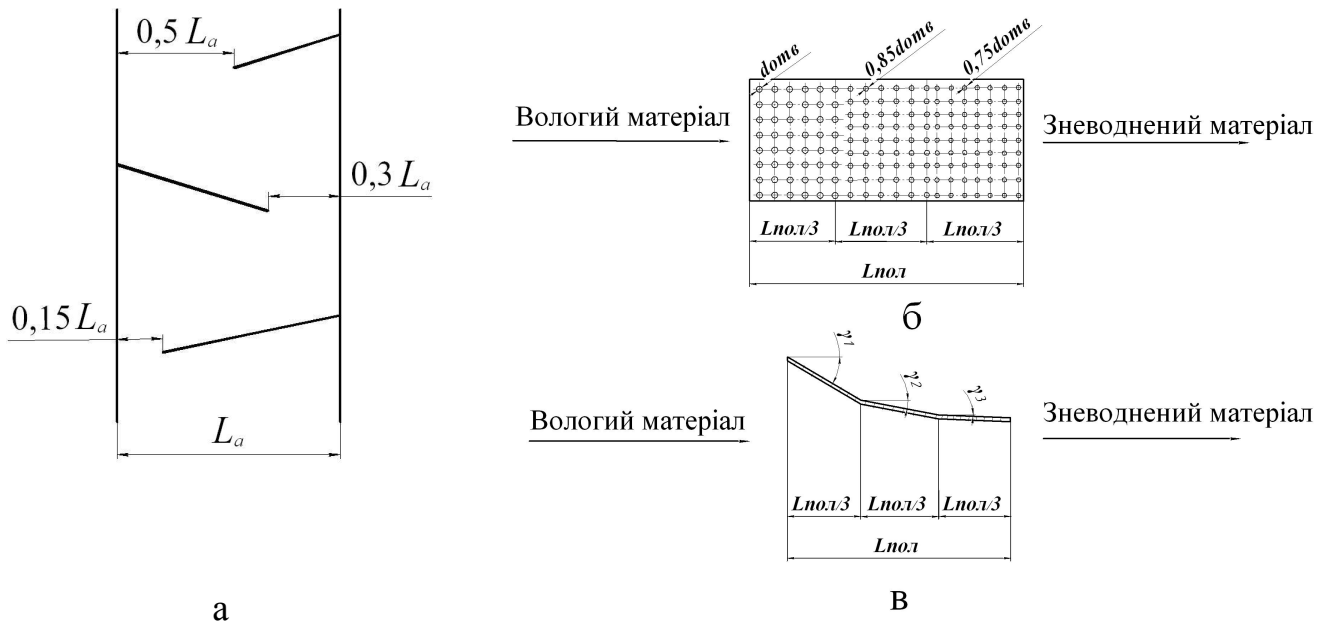


Рисунок 5.8 – Конструкції полиць багатоступеневої гравітаційної поличної сушарки: а – полиця з різним зазором по висоті сушарки; б – секціонована полиця зі змінною перфорацією секцій; в – секціонована полиця з постійною перфорацією секцій та змінним кутом їх нахилу; γ_i – кут нахилу секції полиці до горизонту

Встановлення в об'ємі пристрою похилих контактних полиць з різним по висоті зазором (рисунок 5.8 а) сприяє підвищенню ефективності сушіння в період видалення вологи з поверхневого шару дисперсного матеріалу та з глибини матеріалу після його нагрівання.

На верхній похилій контактній полиці при контакті дисперсного матеріалу з сушильним агентом (нагрівання) де величина зазору має максимальне значення, довжина полиці є мінімальною, що забезпечує мінімально необхідний час контакту фаз та повне нагрівання без перегрівання дисперсного матеріалу, що може негативно впливати на процес при сушінні термолабільних матеріалів. В цей же час на ній відбувається видалення дрібної фракції, тобто верхня похила контактна полиця виконує роль сепаратора, що позитивно впливає на формування зваженого шару на на-

ступних полицях контакту завдяки вирівнюванню значення порізності. На середній похилій контактній полиці, де величина зазору є меншою, при контакті дисперсного матеріалу з сушильним агентом (видалення вологи з поверхневого шару) час перебування дисперсного матеріалу та контакту з сушильним агентом збільшується внаслідок збільшення довжини контактної полиці, що сприяє інтенсивному видаленню незв'язаної вологи; при цьому час перебування дисперсного матеріалу на полиці відповідає необхідному значенню часу сушіння в цьому періоді (період постійної швидкості сушіння). На нижній похилій контактній полиці при контакті дисперсного матеріалу з сушильним агентом (видалення вологи з глибини матеріалу), де величина зазору має мінімальне значення, довжина полиці є максимальною, що забезпечує ефективне видалення зв'язаної вологи з глибини матеріалу та максимально необхідний час контакту фаз в цьому періоді (період спадання швидкості сушіння).

Перфорація похилої контактної полиці отворами різного діаметру (рисунки 5.8 б) дозволяє створити на ній таку гідродинамічну ситуацію, при якій відбувається вирівнювання епюри швидкості руху сушильного агента по довжині полиці, його дія по всій довжині залишається постійною. Це обумовлює процес компенсації дії на дисперсний матеріал сил інерції та скочування по похилій поверхні, гальмування дисперсного матеріалу на похилій контактній полиці, його рівномірний рух у зваженому шарі і довготривалий контакт з сушильним агентом [159].

Зважаючи на постійність витрати сушильного агента в кожному з перерізів пристрою, наявність в ньому зазору між кінцем похилої контактної полиці і стінкою, а також різним вільним перерізом проходу сушильного агента в окремих частинах пристрою, встановлення похилих контактних полиць з зазначеною перфорацією буде зменшувати перепад швидкості руху сушильного агента по довжині похилої контактної і в зазорі між кінцем похилої контактної полиці і стінкою. Це сприяє підвищенню рівномірності контакту сушильного агента з дисперсним матеріалом.

Зазначена конструкція похилих контактних полиць сприяє зменшенню інтенсивності процесу вихроутворення внаслідок компенсації сил, які утворюють вихор при огинанні кінця похилої контактної полиці, збільшенням сили дії висхідного потоку сушильного агента.

Встановлення в об'ємі пристрою похилих контактних полиць при дотриманні визначеної перфорації сприяє підвищенню ефективності сушіння в період видалення вологи з поверхневого шару дисперсного матеріалу та з глибини матеріалу після його нагрівання.

Виконання похилої перфорованої контактної полиці збірною з окремих частин зі змінним кутом нахилу до горизонту (рисунок 5.8 в) дозволяє створити на ній таку гідродинамічну ситуацію, при якій відбувається вирівнювання епюри швидкості руху сушильного агента по довжині похилої перфорованої контактної полиці, його дія по всій довжині залишається постійною. Це обумовлює процес компенсації дії на дисперсний матеріал сил інерції та скочування по похилій поверхні, гальмування дисперсного матеріалу на похилій перфорованій контактній полиці, його рівномірний рух у зваженому шарі і довготривалий контакт з сушильним агентом.

Зазначена конструкція похилих перфорованих контактних полиць сприяє зменшенню інтенсивності процесу вихроутворення внаслідок компенсації сил, які утворюють вихор при огинанні кінця похилої контактної полиці, збільшенням сили дії висхідного потоку сушильного агента.

Використання похилих перфорованих контактних полиць наведених конструкцій дозволяє створити на кожному ступені сушарки такої гідродинамічної ситуації, при якій відбувається вирівнювання епюри швидкості руху сушильного агента по довжині полиці, його дія залишається постійною на всіх ділянках полиці. Це обумовлює процес компенсації дії на дисперсний матеріал сил інерції та скочування по похилій поверхні, гальмування дисперсного матеріалу на похилій перфорованій контактній полиці, його рівномірний рух у зваженому шарі і довготривалий контакт з сушильним агентом.

Запропоновані конструкції полиць дозволяють зменшити величину зони II за довжиною полиці, а також більш рівномірно розподілити швидкість руху сушильного агента в ній.

Порівняльні епюри розподілення швидкості руху сушильного агента по довжині апарата при різному конструктивному виконанні полиць подана на рисунку 5.9.

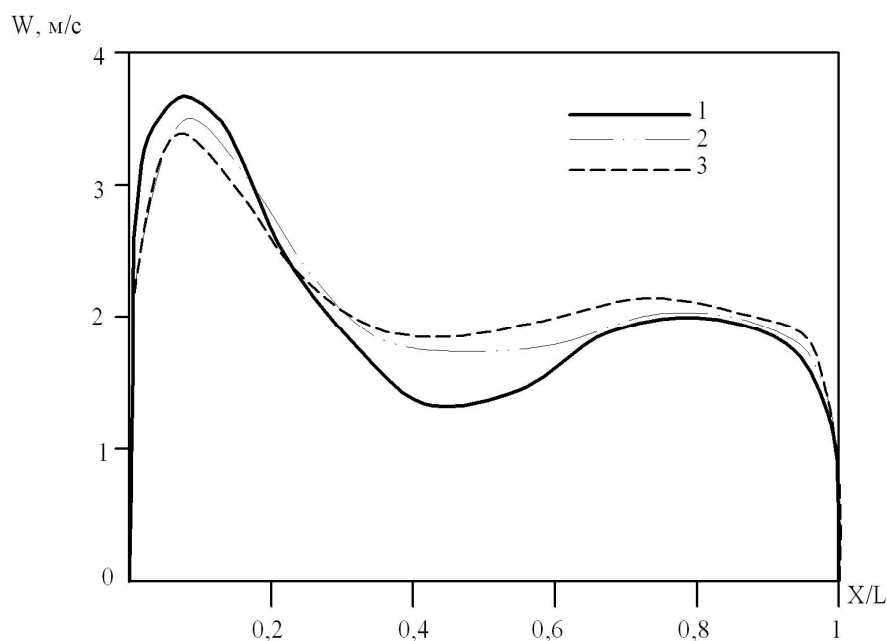


Рисунок 5.9 – Епюра розподілення швидкості руху газового потоку по довжині апарата при $X/L = 0,15$; $\psi = 15\%$; $H = 0,25$ м: 1 – полиця з постійною перфорацією по довжині; 2 – секціонована полиця зі змінною перфорацією секцій; 3 – секціонована полиця з постійною перфорацією секцій та змінним кутом їх нахилу

5.3 Інженерна методика розрахунку багатоступеневої гравітаційної поличної сушарки. Оптимізація енерговитрат на процес сушіння в багатоступневих апаратах

Розрахунок поличних апаратів для зневоднення дисперсних матеріалів потребує достатньо широкого списку вихідних даних. Необхідно знати властивості фаз, фракційний склад дисперсної фази, витрати матеріальних потоків, теплофізичні властивості фаз і т.п.

В основу методики інженерного розрахунку таких апаратів покладено результати теоретичних і експериментальних досліджень гідродинамічних показників руху потоків та інтенсивності зневоднення дисперсних матеріалів.

За результатами моделювання процесу сушіння дисперсної фази визначається необхідний час її зневоднення в потоці сушильного агента із заданими характеристиками. Одержані теоретично та експериментально гідродинамічні характеристики руху потоків сушильного агента та дисперсного матеріалу дозволяють визначити час його перебування в апараті залежно від конструкції поличних контактів та

технологічних параметрів процесу. На етапі аналізу закономірностей кінетики процесу зневоднення дисперсного матеріалу на каскаді полиць визначається оптимальна організація руху потоків, яка забезпечить мінімальні енергетичні витрати при необхідній кінцевій вологості продукту.

В результаті проведення оптимізаційного розрахунку гравітаційної полицної сушарки відповідно до вихідних даних, встановлених замовником промислового обладнання, стає можливим визначити її наступні конструктивні характеристики [160]:

- кількість полицних контактів в сушарці;
- кут нахилу полицних контактів до горизонту;
- величину зазору між кінцем полицного контакту та стінкою сушарки (або довжину полицного контакту);
- площу вільного перерізу полицного контакту.

Конструктивні характеристики полицних контактів на кожному зі ступенів сушарки можуть відрізнятись, що обумовлюється фізико-хімічними характеристиками та показниками міцності дисперсного матеріалу, його стабільністю при довготривалому впливі високотемпературного сушильного агента, а також мінімізацією енерговитрат на проведення процесу зневоднення.

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 багатоступінчастих апаратів з вертикальним секціонуванням для зневоднення дисперсних матеріалів з внесенням змін та уточнень в існуючі алгоритми.

Алгоритм інженерного розрахунку гравітаційної полицної сушарки наведено в додатку Б. Алгоритм включає наступні етапи (відповідно до нумерації блоків блок-схеми):

1. Введення початкових характеристик дисперсного матеріалу та сушильного агента (густина, температура – за даними замовника розрахунку, вологість – за даними замовника розрахунку, інші фізико-хімічні властивості за необхідності), конструкції полиць (кут нахилу, зазор, перфорація, вільний переріз однаковий на всіх ступенях) та

їх кількість, форми корпусу (циліндрична, квадратна, прямокутна), організації руху сушильного агента (в першому наближенні обирається найменш енергозатратний).

2. Розрахунок необхідного часу сушіння дисперсної фази в апараті (формула 3.17).

3. Визначення поля швидкості сушильного агента в надполицевому просторі і розвантажувальному зазорі кожного ступеню сушарки (формула 3.44).

4. Визначення режиму роботи сушарки за даними експериментальних досліджень (п. 4.2.2 дисертації), розрахунок часу перебування дисперсної фази на полиці (формула 3.28) та в сушарці в режимі стисненого руху (формула 3.30).

5. Перевірка умови повного протікання процесу зневоднення в дисперсній фазі. При виконанні умови – перехід на наступний етап. При невиконанні умови – повернення до вихідних даних, зміна конструкції полиць та їх кількості, організації руху сушильного агента. На цьому етапі оптимізації припускається конструювання сушарки з різними характеристиками полиць на кожному ступені.

6. Розрахунок термічних та вологісних характеристик потоків, визначення ефективності кожного ступеня сушарки (за математичним апаратом, описаним в п. 3.2.3 дисертації)

7. Демонстрація результатів оптимізаційного розрахунку.

8. Визначення діаметра апарата (лінійні розміри для нециліндричних сушарок) та діаметра технологічних штуцерів [161], висот сепараційного та розвантажувального просторів сушарки [162], висоти міжполицевого простору (за даними компоновки окремих вузлів сушарки).

9. Ескіз промислового зразка сушарки з основними розмірами вузлів.

Методика оцінювання енергоефективності процесу.

Проведення багатьох технологічних процесів у багатофазному середовищі з активним аеродинамічним режимом супроводжується не лише інтенсифікацією тепломасоперенесення на поверхні контакту взаємодіючих фаз, але й значними втратами енергії. При цьому підвищення турбулентності потоку теплоносія при проходженні його через шар дисперсного матеріалу з метою інтенсифікації процесу сушіння без внутрішньозернових обмежень вологоперенесення призводить до більш

швидкого зростання витрат енергії, аніж швидкості сушіння [163]. Тому можна сказати, що при деяких граничних значеннях швидкості теплоносія та ступеня його турбулізації, економічність такого аеродинамічного методу інтенсифікації сушіння знижується. Природнім чином виникає потреба в методиці оцінювання енергоефективності тепломасообміну в системі «тверде-газ» по критерію питомих енерговитрат на інтенсифікацію, аналогічно [139].

Для обґрунтування подібної методики будемо виходити з поширених, експериментально підтверджених узагальнених залежностей між впливаючими технологічними факторами.

Так, питома вартість процесу сушіння складається з вартості енергоресурсу (сушильного агента) та експлуатаційних витрат записаних у вигляді двочленної цільової функції [164]:

$$F = (aV_{суш} + C_г) / M, \quad (5.1)$$

де a – вартість енергоресурсу, грн/м³; $C_г$ – виробнича складова вартості продукту без витрат на сушіння, грн/год; M – продуктивність процесу по видаленій волозі, кг/годину.

Зрозуміло, що виробничий діапазон коливань співвідношення витрат сушильного агента $V_{суш}$ до витрат вологого матеріалу V_m обмежується з одного боку, аеродинамічними умовами існування зваженого шару, а з іншого – швидкістю винесення найменших зернин (пилової фракції) продукту. В цьому ж діапазоні існує застереження, що недостатня кількість теплоносія на межі утворення зваженого шару може не забезпечити необхідну якість сушіння. Оптимізаційна задача, таким чином, полягає у визначенні мінімального співвідношення витрат теплоносія та дисперсного матеріалу в обмеженнях прийнятних техніко-економічних показників сушарки. Значення витрат сушильного агента, яке відповідає граничній швидкості (початок переходу матеріалу в зважений стан), в подальшому стає фактором оцінювання питомих енерговитрат.

Після цього, виходячи з найпростіших ступеневих критеріальних оцінювань зв'язку ефективності видалення вологи з витратами теплоносія (рисунок 5.10) в зваженому шарі, можна оцінити питомі енерговитрати процесу сушіння.

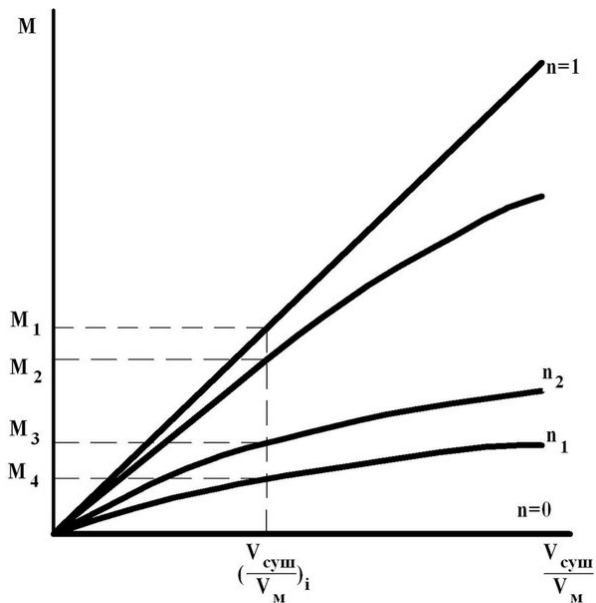


Рисунок 5.10 – Вплив співвідношення витрат повітря та дисперсного матеріалу $V_{суш}/V_M$ на кількість видаленої вологи в залежності від емпіричного показника n ($n_2 > n_1$)

ментальних залежностей, зокрема, гіперболічна чи експоненціальна, адекватність яких після статистичної обробки може бути не гірша за ступеневу функцію. Але на даному етапі нас цікавить визначення самої можливості загального підходу до оцінювання енергоефективності сушарок по питомим витратам, незважаючи на похибки тієї чи іншої апроксимації.

В найбільш загальних апроксимаціях зростання продуктивності сушіння по видаленій волозі (рисунок 5.11), показник ступеню звичайно не перевищує $n \leq 0,5$ для монодисперсних матеріалів з гладкою кулястою поверхнею та $n \leq 0,3$ для полідисперсних шорстких матеріалів з мінімальними обмеженнями внутрішньозернового перенесення вологи [119]. Аналогічна тенденція зниження ефективності використання сушильного агента при збільшенні його витрат спостерігається і при сушінні частинок активним вентиляванням [165].

Зіставлення графічних залежностей на рисунку 5.10 показує загальну тенденцію зменшення ефективності використання сушильного агента при збільшенні його відносних витрат. При цьому для кращих конструкцій сушарок властиві більш круті характеристики з більшими показниками $n \rightarrow 1$. Відповідно, використання повітря в неекономічних конструкціях ($n \rightarrow 0$) вкрай неефективне, збільшення його відносних витрат не дає очікуваного приросту кількості видаленої вологи, що графічно характеризується похилими кривими в нижній частині графіку. Слід зауважити, що подібний характер мають і ряд інших експериментальних залежностей, зокрема, гіперболічна чи експоненціальна, адекватність яких після статистичної обробки може бути не гірша за ступеневу функцію. Але на даному етапі нас цікавить визначення самої можливості загального підходу до оцінювання енергоефективності сушарок по питомим витратам, незважаючи на похибки тієї чи іншої апроксимації.

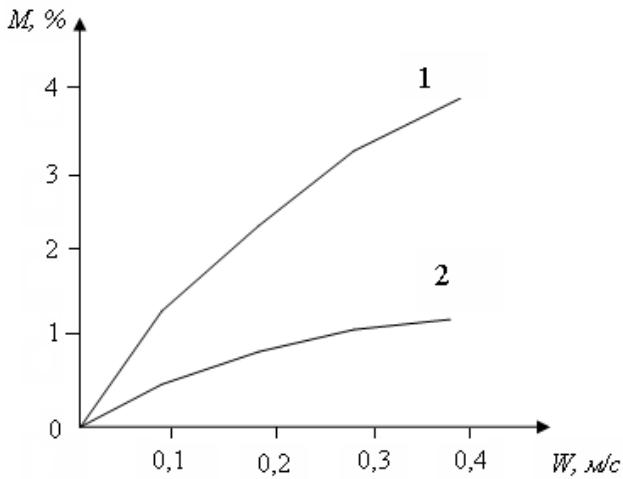


Рисунок 5.11 – Зниження відносної кількості вологи, що видаляється теплоносієм (повітрям) в залежності від його швидкості та початкової вологості матеріалу [165]: 1 – 30 % , 2 – 65 %

Використаємо вказані залежності для аналізу введеної раніше цільової функції (5.1), враховуючи пропорційність між масою видаленої вологи та відносними витратами енергоносія в ступені n [166].

$$M \sim V_{суш}^n \quad (5.2)$$

Підставляючи залежність продуктивності M з виразу (5.2) в цільову економічну функцію питомих витрат (5.1), отримаємо:

$$F = \frac{aV_{суш} + C_в}{V_{суш}^n} = aV_{суш}^{1-n} + C_вV_{суш}^{-n} \quad (5.3)$$

Мінімум функції питомих витрат досягається за умови:

$$\frac{dF}{dV_{суш}} = 0,$$

або

$$a(1-n)V_{суш}^{-n} - C_вnV_{суш}^{-(1+n)} = 0.$$

Звідки після перетворень отримаємо значення мінімальних витрат теплоносія при фіксованих економічних параметрах a і $C_в$:

$$V_{суш}^{-n}[a(1-n) - C_вnV_{суш}^{-1}] = 0,$$

або нехтуючи тривіальним коренем $V_{суш}^{-n} = 0$

$$V_{суш} = \frac{C_g n}{a(1-n)}. \quad (5.4)$$

Реалізація подібної процедури оцінювання енергоефективності сушіння по витратам теплоносія при фіксованих температурних та вологісних характеристиках взаємодіючих фаз може мати практичне застосування. При цьому наявність різного роду експериментальних технологічних апроксимацій для складових цільової функції дозволить знайти межі економічно обґрунтованого співвідношення витрат теплоносія та дисперсного матеріалу.

Конкретизація вартості енергоресурсу a , виробничої складової C_g та показника n ступеневої функції для визначеного типу дисперсного матеріалу і сушарки, робить можливим обчислення функції питомих витрат за формулою (5.3). Наприклад, для вартості енергоресурсу (нагрітого повітря) $a = 1,35$ грн/м³, експлуатаційних витрат $C_g = 0,8$ грн/год, $n = 0,53$ отримаємо функцію відносних питомих витрат у вигляді, показаному на рисунку 5.12, з характерним мінімумом, що відповідає найбільш економічній витраті сушильного агента згідно виразу (5.4).

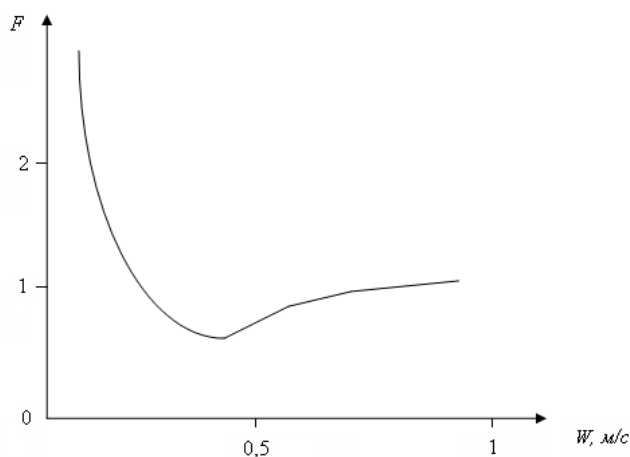


Рисунок 5.12 – Характерний вигляд функції питомих витрат

Використовуючи наведені дані розрахунку питомої вартості процесу сушіння піску в сушарках різних конструкцій, отримано результати, наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Порівняльна характеристика енергоефективності процесу сушіння піску в апаратах різного типу*

Тип сушарки	Параметр n	Питома вартість видалення вологи, грн/кг
Полична сушарка	0,53	51,6
Сушарка зваженого шару	0,49	73,99
Пневмотранспортна сушарка	0,46	97,24
Стрічкова сушарка	0,43	129,93

* Початкова вологість – 13 % , кінцева – 7 % , продуктивність – 1000 кг/год.

5.4 Дослідно-промислове випробування гравітаційної поличної сушарки

5.4.1 Опис дослідно-промислової установки

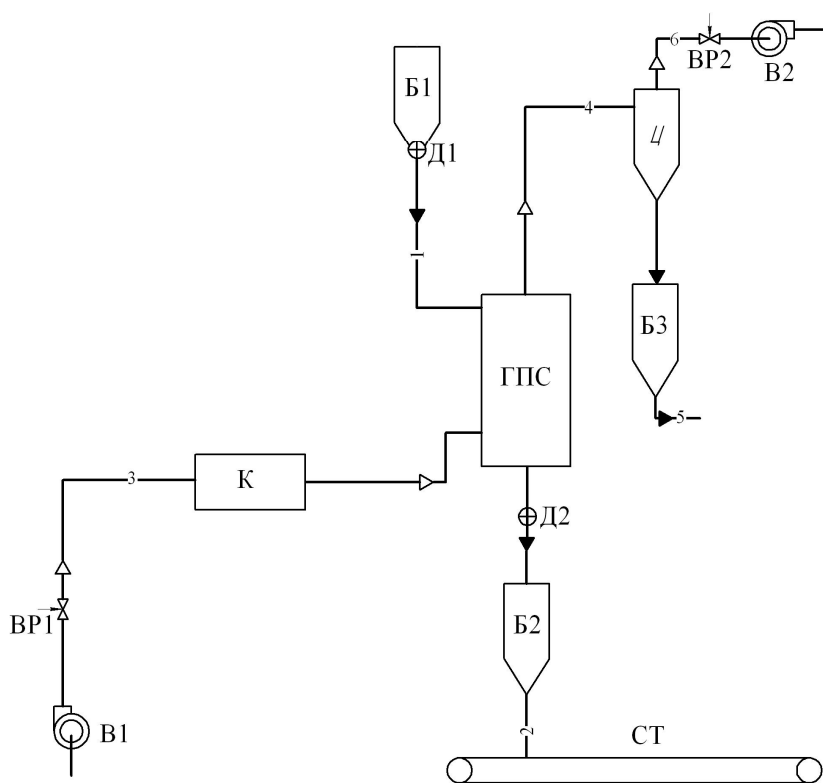
Відповідно до схеми (рисунок 5.13) вологе зерно соняшника подається транспортером в приймальний бункер Б1 і за допомогою дозатора Д1 подається на верхню полицю гравітаційної поличної сушарки ГПС. Вентилятором В1 повітря направляється для подачі в калорифер К. Гаряче повітря надходить в нижню частину сушарки ГПС через штуцер в корпусі, рівномірно розподіляється по перерізу і послідовно проходить всі ступені сушарки. Вологе зерно соняшника на кожному зі ступенів сушарки контактує з сушильним агентом і після зневоднення відводиться через штуцер в днищі сушарки та через дозатор Д2 надходить до бункеру Б2, а потім на стрічковий транспортер СТ.

Для розширення діапазону сушіння дослідно-промислова установка складалась з 2–х окремих поличних сушарок, з'єднаних між собою послідовно. Кількість поличних контактів кожної з них визначалась кінетичним часом сушіння конкретного матеріалу.

5.4.2 Результати дослідно-промислових випробувань

Впровадження дослідно-промислового зразка гравітаційної поличної сушарки проведено для сушіння зерен пшениці та соняшника. Внаслідок проведення ди-

ференційованого режиму зневоднення було досягнуто підвищення швидкості та ефективності видалення вологи взагалі на 3–5 % при незмінних енерговитратах і збереженні якісних показників готового продукту [167].



Експлікація трубопроводів

Умовне позначення	Потік
— 1 —	Вологий матеріал
— 2 —	Зневоднений матеріал
— 3 —	Повітря
— 4 —	Відпрацьоване повітря
— 5 —	Дрібна (нетоварна) фракція
— 6 —	Очищене повітря

Експлікація обладнання

Позн.	Найменування	Кіл.
ГПС	Гравітаційна полична сушарка	1
К	Калорифер	1
Б1	Бункер вологого матеріалу	1
Б2	Бункер зневодненого матеріалу	1
Ц	Циклон	1
Д1-2	Дозатор	2
СТ	Стрічковий транспортер	1
В1-2	Вентилятор	2
BP1-2	Вентиль регулюючий	2

Рисунок 5.13 – Принципова схема дослідно-промислової установки (рециркуляційний і байпасні потоки теплоносія на схемі не показано)

Враховуючи, що процесу сушіння була піддана термолабільна продукція, яка після термообробки повинна зберегти свої властивості, можна констатувати, що проведення зневоднення в заявленому апараті відрізняється «м'яким», але в той же час ефективним режимом. Висушені зерна пшениці та соняшника в подальшому були використані в якості насіння і показали хорошу схожість (не менше 90 % для зазначених культур). Аналіз отриманих даних дослідно-промислового впровадження гравітаційної поличної сушарки для зневоднення зерен пшениці та соняшника показав, що застосування апарата даного типу дозволяє знизити габарити установки і споживання енергії на підігрів сушильного агента в порівнянні з конвективними сушарками іншого типу. При цьому якість висушеного зернистого матеріалу відповідає нормативним показникам.

В таблиці 5.2 наведено експериментальні дані щодо розрахунку параметрів взаємодіючих потоків дослідно-промислової установки для сушіння зерен соняшника. Початкова температура сушильного агента для проведеного експерименту коливається в межах 90–140 °С залежно від організації руху потоків [168].

На рисунку 5.14 показана крива сушіння, побудована за експериментальними даними промислового впровадження поличної сушарки при сушінні зерен соняшника.

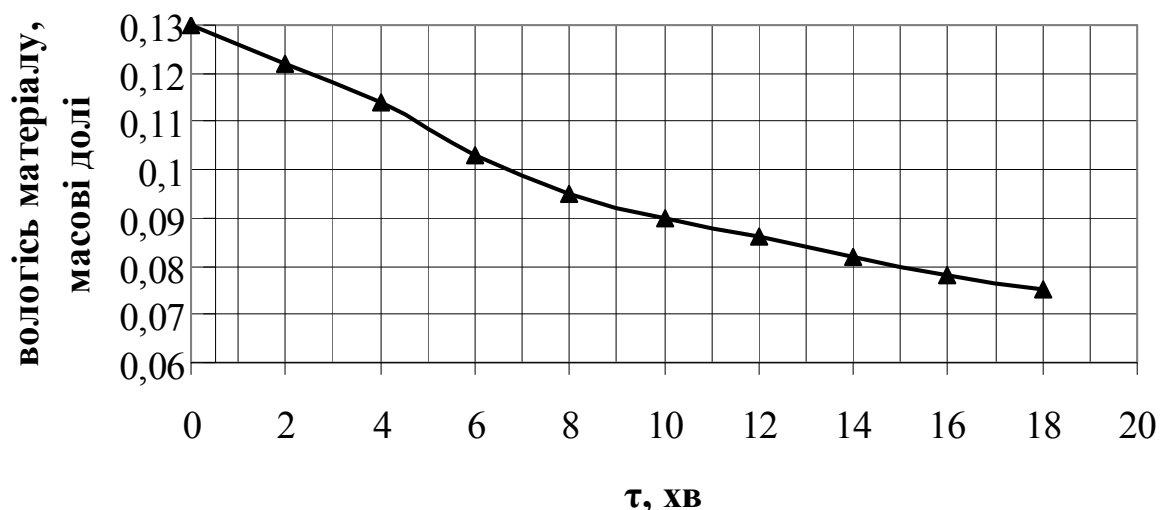


Рисунок 5.14 – Крива сушіння зерна соняшника в каскаді поличних апаратів

Експериментальні дані (рисунок 5.14) дають можливість підібрати оптимальний режим сушіння зерен соняшника шляхом варіювання конструктивних параметрів поличних контактних елементів, що дає змогу забезпечити необхідний час сушіння і інших матеріалів в даній конструкції апарата.

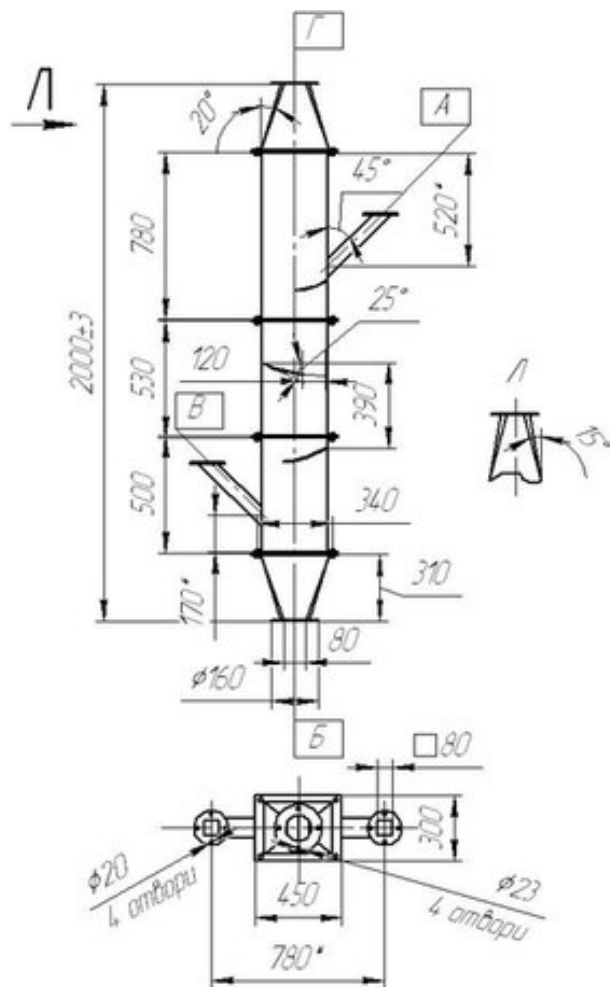
Дослідно-промисловий зразок поличної сушарки представлено на рисунку 5.15.

Таблиця 5.2 – Експериментальні дані кінцевої вологості дисперсного матеріалу залежно від організації руху сушильного агента (на прикладі сушіння зерен сояшника)

Характеристика потоку сушильного агента	Витрата матеріалу, кг/год	Початкова вологість матеріалу, %	Початкова температура матеріалу, °С	Кінцева вологість матеріалу, %	Кінцева температура матеріалу, °С	Витрата сушильного агента, кг/год
Протитечія без рециркуляції і байпасування сушильного агента	36	13	20	7,3	45	108
Протитечія з одноразовою повною рециркуляцією сушильного агента	36	13	20	9,2	35	108
Протитечія з байпасуванням сушильного агента перед другим ступенем	36	13	20	7,4	43	72+36
Протитечія з байпасуванням сушильного агента перед третім ступенем	36	13	20	7,5	41	72+36
Протитечія з рециркуляцією сушильного агента (50% від загальної витрати)	36	13	20	8,3	39	108
Протитечія з рециркуляцією сушильного агента (25% від загальної витрати)	36	13	20	7,8	40	108

Продовження таблиці 5.2

Протитечія з рециркуляцією сушильного агента (15% від загальної витрати)	36	13	20	7,6	40	108
Протитечія з байпасуванням сушильного агента перед другим ступенем	36	13	20	6,8	47	108+36
Протитечія з байпасуванням сушильного агента перед третім ступенем	36	13	20	7	45,5	108+36



Позначення	Найменування
А	Вхід вологого матеріалу
Б	Вихід сухого матеріалу
В	Вихід сушильного агента
Г	Вихід відпрацьованого сушильного агента

Рисунок 5.15 – Промисловий зразок полицної сушарки

5.5 Висновки до п'ятого розділу

1. Проведено аналіз та зіставлення результатів математичного моделювання та експериментальних досліджень гідродинаміки робочого простору гравітаційної поличної сушарки, температурно-вологісних характеристик взаємодіючих потоків та ефективності ступенів сушарки. Похибку результатів оцінено на рівні 4–7 %.

2. Відносні витрати сушильного агента, що відповідають граничній швидкості (початку переходу матеріалу в зважений стан) розглядаються як основний фактор оцінювання питомих енерговитрат.

3. На підставі аналізу даних досліджень визначено напрями удосконалення конструкції гравітаційних поличних сушарок.

4. Запропоновано методики інженерного розрахунку та оцінювання енергоефективності процесу сушіння дисперсних матеріалів.

5. Запропоновано нові конструкції гравітаційних поличних сушарок, що захищені патентами України.

6. Серія випробувань напівпромислової поличної сушарки для харчових зернистих матеріалів, виконаних на базі ФГ «Яковлева», показала позитивні перспективи впровадження компактних поличних апаратів в виробництвах малої та середньої потужності. Висушені зерна пшениці та соняшника при використанні їх в якості насіннєвого фонду показали хорошу схожість (не менше 90%). Досягнуто підвищення швидкості та ефективності видалення вологи взагалі на 3–5% при незмінних енерговитратах і збереженні якісних показників готового продукту.

Основні наукові результати розділу опубліковані в роботах [139,154,155,159,160,163,164,166-168].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На підставі літературного огляду існуючих конструкцій різних типів сушарок зваженого шару та порівняльного аналізу їх ефективності доведено, що використання багатоступеневих гравітаційних поличних сушарок є перспективним та енергоефективним напрямом технології конвективного сушіння.

2. Запропонована фізична модель руху взаємодіючих потоків, що взаємодіють, яка дає можливість визначити періоди сушіння дисперсного матеріалу щодо особливостей проведення даного процесу в гравітаційній поличній сушарці.

3. Створено математичну модель, що дозволяє визначати час нагрівання та зневоднення дисперсного матеріалу, гідродинамічний час перебування дисперсної фази в робочому просторі сушарки в режимі вільного і стисненого руху, температурно-вологісні характеристики потоків, що взаємодіють, та ефективність кожного ступеня сушарки з урахуванням гідродинаміки робочого простору апарата, конструкції полиць, характеристик і способу організації руху сушильного агента.

4. Експериментально визначено три основних (режим гравітаційного падаючого шару, режим зваженого шару, режим винесення дисперсного матеріалу) та два перехідних режими роботи сушарки залежно від навантаження за потоками та часу перебування дисперсної фази в апараті в кожному з режимів. У режимі зваженого шару, який визначено найбільш ефективним для сушіння, час перебування матеріалу на полиці під час його стисненого руху за різних умов проведення експерименту становить від 25 до 120 с.

5. Одержано критеріальну залежність, яка дозволяє прогнозувати значення коефіцієнта масовіддачі під час сушіння в гравітаційних поличних сушарках. Установлено, що основний вплив на коефіцієнт масовіддачі чинять гідродинамічний режим роботи апарата і вологісні характеристики сушильного агента.

6. Експериментальним шляхом досліджено вплив конструкції полиці та організації руху сушильного агента на гідродинамічні показники руху потоків у робочому просторі гравітаційної поличної сушарки та інтенсивність зневоднення дисперсного матеріалу. За різних умов проведення експерименту визначено діапазон ефек-

тивностей окремих ступенів сушарки в межах 0,12–0,47. При цьому кількість видаленої вологи з матеріалу може становити від 4 до 8 % мас. при початковому значенні вологості дисперсного матеріалу 13 % мас.

7. Проведено порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень гідродинаміки робочого простору гравітаційної поличної сушарки, температурно-вологісних характеристик потоків, що взаємодіють, та ефективності ступенів сушарки. Похибку результатів оцінено на рівні 4–7 %. Розроблено механізми управління часом перебування вологого матеріалу в гравітаційній поличній сушарці та методи підвищення ефективності сушіння окремих ступенів апарата.

8. Запропоновано методики інженерного розрахунку та оцінювання енергоефективності процесу сушіння дисперсних матеріалів.

9. Запропоновано нові конструкції пристроїв для сушіння дисперсних матеріалів, захищених патентами України. На базі аналізу результатів дисертаційної роботи досліджений апарат впроваджено в технологічну лінію сушіння зерен сільськогосподарських культур.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kudra T. *Advanced Drying Technologies* / T. Kudra, A. S. Mujumdar – New York: Marcel Dekker, 2002. – 459 p.
2. Сажин Б. С. *Основы техники сушки* / Сажин Б. С. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
3. Воробьёв А. М. Сушильные аппараты с активным гидродинамическим режимом / А. М. Воробьёв, Г. С. Кормильцин, А. А. Горелов, С. П. Рудобашта // *Вестник ТГУ*. – 2001. – Т. 6, вып. 2. – С. 227–229.
4. Гельперин Н. И. *Основы техники псевдооживления* / Гельперин Н. И., Айнштейн В. Г., Кваша В. Б. – М.: Химия, 1967. – 664 с.
5. Davidson J. F. *Fluidization* / Davidson J. F., Clift R., Harrison D. – Academic Press, 1985. – 733 p.
6. Лева М. *Псевдооживление* / Лева М.; пер. с англ. Айнштейна В. Г. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 400 с.
7. Kunii D. *Fluidization engineering* / D. Kunii, O. Levenspiel – Boston: Butterworth – Heinemann, 1991. – 491 p.
8. Беранек Я. *Техника псевдооживления* / Я. Беранек, Д. Сокол.; пер. с чешск. В. Г. Айнштейна; под ред. Н. И. Гельперина. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – 157 с.
9. Kwauk M. *Fluidization: Idealized and Bubbleless, with Application* / Kwauk M. – Beijing: Science Press; and New York: Ellis Horwood, 1992. – 277 p.
10. Донат Е. В. *Разработка и исследование аппаратов взвешенного слоя для интенсификации технологических процессов* / Е. В. Донат, Н. П. Юхименко // *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*. – 2001. – №9(30)–10(31). – С. 16–21.
11. Забродский С. С. *Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое* / Забродский С. С. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 488 с.
12. Ханик Я. М. *Гідродинаміка при сушінні нерівномірного нерухомого шару дисперсного матеріалу* / Я. М. Ханик, Г. О. Мазяр, І. О. Гузьова, Я. Д. Ярош // *Науковий вісник НЛТУ України*. – 2008. – Вип. 18.3. – С. 104–107.

13. Апарати зваженого шару. Теоретичні основи і розрахунок / [Юхименко М. П., Вакал С. В., Кононенко М. П., Філонов А. П.]. – Суми: Собор, 2003. – 304 с.
14. 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.
15. Boyadjiev Chr. B. Non-linear mass transfer and hydrodynamic stability / Chr. B. Boyadjiev, V. N. Babak – Amsterdam: Elsevier Science B. V., 2000. – 500 p.
16. Обезвоживание растворов в кипящем слое / [Тодес О. М., Каганович Ю. Я., Налимов С. П., Гольцикер А. Д., Себалло В. А., Фридман Д. И.]. – М.: Металлургия, 1973. – 288 с.
17. Разумов И. М. Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов / Разумов И. М. – М.: Химия, 1972. – 240 с.
18. Wen-Ching Yang. Fluidization, solids handling, and processing / Wen-Ching Yang. – Westwood: Noyes Publications, 1998. – 890 p.
19. Бараков А. В. Моделирование гидродинамики и теплообмена в перемещающемся псевдооживленном слое: дисс. ... доктора техн. наук: 05.14.04 / Бараков Александр Валентинович. – Воронеж, 2005. – 235 с.
20. Мухленов И. П. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник / Мухленов И. П., Сажин Б. С., Фролов В. Ф. – Л.: Химия, 1986. – 352 с.
21. Берд Р. Явления переноса / Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. – М.: Химия, 1974. – 688 с.
22. Юхименко Н.П. Охлаждение и пневмокласификация гранулированных и зернистых материалов в гравитационном полочном аппарате: дис. ... кандидата техн. наук: 05.17.08 / Юхименко Николай Петрович. – М., 1988. – 193 с.
23. Муштаев В. И. Сушка в условиях пневмотранспорта / Муштаев В. И., Ульянов В. М., Тимонин А. С. – М.: Химия, 1984. – 232 с.
24. Сокольский А. И. Термическая обработка дисперсных материалов в аппаратах с вихревыми двухфазными потоками: дисс. ... докт. техн. наук: 05.17.08 / Сокольский Анатолий Иванович. – Иваново, 2005. – 320 с.
25. Лыков А. В. Теория сушки. / Лыков А. В. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

26. Романков П. Г. Массообменные процессы химической технологии / Романков П. Г., Рашковская Н. Б., Фролов В. Ф. – Л.: Химия, 1975. – 336 с.
27. Голубець В. М. Теплообмін у процесі сушіння сипучих матеріалів з деревини у киплячому шарі / В. М. Голубець, І. М. Озарків, Й. Л. Ацбергер // Науковий вісник. – 2003. Вип. 13.1. – С. 93–100.
28. Левина Н. С. Исследование кинетики нагрева и сушки пористых материалов / Н. С. Левина // Ползуновский вестник. – 2008. – № 1-2. – С. 49–52.
29. Липин А. В. Кинетика конвективной сушки многокомпонентных фармацевтических смесей / А. В. Липин // МИТС-НАУКА: международный научный вестник. – 2006. – № 3. – С. 1–6.
30. Дмитриев В. М. Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление процесса конвективной сушки гранулированных и плёночных полимерных материалов: дисс. ...докт. техн. наук: 05.17.08 / Дмитриев Вячеслав Михайлович. – Тамбов, 2003. – 460 с.
31. Атаманюк В. М. Теплообмін під час фільтраційного сушіння осажденного і гранульованого поліакриламиду / В. М. Атаманюк, М. С. Мальований // Науковий вісник НЛТУ України. – 2010. – Вип. 20.6. – С. 113–121.
32. Mujumdar A. S. Handbook of Industrial Drying / Mujumdar Arun S. – Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006. – 1280 p.
33. Карнаушенко Ю. В. Пути развития основных способов сушки и методы их интенсификации / Ю. В. Карнаушенко // Рыбне господарство України. – 2010. – № 1. – С. 26–28.
34. Поперечний А. М. Аналіз конструктивних особливостей сушарок із псевдорідженим шаром і перспективи їх удосконалення / А. М. Поперечний, І. В. Жданов // Обладнання та технології харчових виробництв. – 2009. – № 20. – С. 44–52.
35. Шолдаев И. С. О закономерностях конвективной сушки (по экспериментальным данным) / И. С. Шолдаев, С. А. Ильина, А. П. Соловьева // Вестник АГТУ. – 2008. – № 2 (43). – С. 215–217.

36. Сажин В. Б. Научные основы техники сушки дисперсных материалов при эффективных гидродинамических режимах взвешенного слоя: автореф. дисс. на соискание науч. степени докт. техн. наук: спец. 05.17.08 «Процессы и оборудование химической технологии» / В. Б Сажин. – М., 2000. – 39 с.
37. Wen-Ching Yang. Handbook of fluidization and fluid-particle systems / Wen-Ching Yang. – New York: Marcel Dekker, 2003. – 850 p.
38. Муштаев В. И. Сушка дисперсных материалов / В. И. Муштаев, В. М. Ульянов. – М.: Химия, 1988. – 352 с.
39. Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions with applications / Gidaspow D. – San Diego: Academic Press, Inc, 1994. – 467 p.
40. Перепадя К. В. Анализ возможности применения псевдоожиженных слоев в судовых теплообменных аппаратах / К. В. Перепадя, Д. К. Перепадя // Вісник СевДТУ. – 2009. – Вип. 95. – С. 155–157.
41. Сажин Б. С., Чувпило Е. А. Типовые сушилки со взвешенным слоем материала. Обзорн. Информ. Сер. ХМ-1 / Б. С. Сажин, Е. А. Чувпило. – М.: ЦИНТИ-химнефтемаш, 1975. – 72 с.
42. Романков П. Г. Сушка во взвешенном состоянии / П. Г. Романков, Н. Б. Рашковская. – Л.: Химия, 1979. – 272 с.
43. Плановский А. Н. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности / Плановский А. Н., Муштаев В. И., Ульянов В. М. – М.: Химия, 1979. – 288 с.
44. Pat. № 6298579 US, Int. Cl F 26 B 21/00. Fluidized-bed drying and classifying apparatus / Noboru Ichitani, Isao Havashi, Mikio Muraio; assignee Kawasaki Jukogyo Kabushiki Kaisha. – № 09/581898; filed 20.06.00; issued 09.10.01.
45. А. с. 1308810 СССР, МКИ F 26 B 17/12, F 26 C 3/16. Теплообменный аппарат для термообработки сыпучих материалов / Н. П. Юхименко, Е. В. Донат (СССР). – № 3964963/24–06; заявл. 14.10.85; опубл. 07.05.87, Бюл. № 17.
46. Pat. № 8726536 US, Int. Cl F 26 B 3/08, F 26 B 17/00. Fluidized bed drying apparatus / Do Won Shun, Chang Keun Yi, Gyong Tae Jin, Sung Ho Cho, Jae

- Hyeon Park, Dal Hee Bae, Ho Jung Ryu, Young Cheol Park, Seung Yong Lee, Si Hyun Lee; assignee Korea Institute of Energy Research. – № 12/901105; filed 08.10.2010; issued 20.05.14.
47. Pat. № 5867921 US, Int. Cl F 26 B 17/00. Fluidized bed apparatus for drying or cooling of powder and a process for drying or cooling powder the same / Harumasa Maruyama, Makio Matsusaka; assignee Powdering Japan K. K. – № 919619; filed 28.08.97; issued 09.02.99.
48. Pat. № 5478544 US, Int. Cl C 01 B 15/12. Method for producing sodium perborate monohydrate / Rüdiger Schütte, Alexander Ruhs, Claas-Jürgen Klasen, Hans-Christian Alt; assignee Degussa Aktiengesellschaft. – № 487477; filed 07.06.95; issued 26.12.95.
49. Pat. № 202792815 China, Int. Cl F 26 B 3/092; F26B25/04. Drying fluidized bed / Liu Zhonglong; Wang Zhigang; Xue Zhushan; assignee Qingdao Oak Kaim Chemical Auxiliary Co., Ltd. – № 20122000221; filed 05.01.12; issued 13.03. 13.
50. Pat. № 102641780 China, Int. Cl B 03 C 1/02. Dry fluidized bed ore dressing apparatus / Shi Yongbing; assignee Hami Heshengyuan Mining Co., Ltd. – № 201210146252; filed 14.05.12; issued 22.08.12.
51. Pat. № 202133234 China, Int. Cl F 26 B 3/08. Multistage circulating and drying fluidized bed / He Conglin; Xiang Zhaobao; Cai Yanhua; assignee Chongqing University of Posts and Telecommunications. – № 201120186522; filed 03.06.11; issued 01.02. 2012.
52. А. с. 1343219 СССР, МКИ F 26 В 17/12. Рециркуляционная сушилка для сыпучих материалов / В. М. Вирченко (СССР). – № 4088119/24–06; заявл. 11.05.86; опубл. 07.10.87, Бюл. № 37.
53. А. с. 1173137 СССР, МКИ F 26 В 17/12, F 28 С 3/16, F 27 D 9/00. Теплообменный аппарат для термообработки сыпучих материалов / Е. В. Донат, В. М. Вирченко, Ю. А. Педосенко (СССР). – № 3712385/24–06; заявл. 21.03.84; опубл. 15.08.85, Бюл. № 30.
54. Пат. 82104 Україна, МПК (2006) F 26 В 17/12, F 26 В 3/02. Сушарка-грохот / Федоров Г. Д., Агеєнко С. Б., Вінниченко В. І., Бабінцев А. В.,

- Котляренко В. В.; заявник та патентовласник Харківський державний технічний університет будівництва та архітектури. – № а200600048; заявл. 03.01.2006; надрук. 11.03.2008.
55. Пат. 8738 Україна, МПК (2006.01) F 26 В 17/12. Установка для сушіння сипучого матеріалу, переважно зерна / Євженко В. О., Міхалевич В. П., Березняк Л. І.; заявник та патентовласник Євженко В. О., Міхалевич В. П., Березняк Л. І. – № u200501504; заявл. 18.02.2005; надрук. 15.08.2005, Бюл. № 8.
56. Пат. 2196285 Российская Федерация, МПК F 26 В 17/10. Сушилка с псевдооживленным слоем для термочувствительных сыпучих материалов / Шишацкий Ю. И.; Семенихин О. А.; Замаев С. М.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение Воронежская государственная технологическая академия. – № 2002104432/06; заявл. 18.02.02; опубл. 10.01.2003.
57. Пат. 2043588 Российская Федерация, МПК F 26 В 17/10. Установка для сушки сыпучих материалов / Слободяник И. П.; Суруханов Б. Б.; Подгородинский В. Е.; заявитель и патентообладатель Научно-производственная фирма "Ньютон". – № 93041248/06; заявл. 16.08.93; опубл. 10.09.95.
58. Пат. 2159403 Российская Федерация, МПК F 26 В 17/10. Сушилка взвешенного слоя с активным гидродинамическим режимом / Кретов И. Т.; Антипов С. Т.; Шахов С. В.; Игнатов В. Е.; Ряховский Ю. В.; заявитель и патентообладатель Воронежская государственная технологическая академия. – № 99111900/06; заявл. 07.06.99; опубл. 20.11.00.
59. Пат. 2181621 Российская Федерация, МПК В 01 J 8/18. Аппарат для обработки дисперсных материалов в псевдооживленном слое / Ерофеев В. К.; Шалимов В. П.; заявитель и патентообладатель Балтийский государственный технический университет "Военмех" им. Д.Ф. Устинова. – № 2001100771/12; заявл. 09.01.01; опубл. 27.04.02.

60. Пат. 2191333 Российская Федерация, МПК F 26 В 17/10. Сушилка / Светлов С. А.; заявитель и патентообладатель Бийский технологический институт Алтайского государственного технического университета им. И. И.Ползунова. – № 2000112866/06; заявл. 23.05.00; опубл. 20.10.02.
61. Пат. 2045722 Российская Федерация, МПК F 26 В 17/10. Сушилка / Успенский В. А.; Абелешев В. И.; заявитель и патентообладатель Харьковский институт инженеров городского хозяйства. – № 5021647/06; заявл. 09.12.91; опубл. 10.10.95.
62. Юхименко Н. П. Сушка термолабильных порошкообразных материалов в аппаратах взвешенного слоя / Н. П. Юхименко // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету: конференція присвячена Дню науки України та 60-річчю СумДУ. – Суми, 2008. – Ч. 1. – С. 51–52.
63. Шандыба Н. А. Эффективная технология противоточной сушки термолабильных материалов / Н. А. Шандыба, Н. П. Юхименко // Научное творчество и интеллектуальный потенциал : опыт и перспективы развития: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. специалистов послевузовской подготовки.– Усть-Каменогорск, 2011. – Ч. 1. – С. 3–4.
64. Шандыба Н. О. Застосування методів оптимізації в енергозберігаючих технологіях / Н. О. Шандыба, М. П. Юхименко, В. О. Герасименко // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». – 2009. – № 1 (20). – С. 125–128.
65. Shandyba N. A. Energy rate optimization under fluidized bed drying / N. A. Shandyba, N. P. Yuhimenko, V. N. Pokotilo // J. Acta Universitatis Pontica Euxinus. – Varna, Bulgaria. – 2011. – Vol. 2. – P. 323–324.
66. Шандыба Н. О. Поличный сушильный аппарат для термолабильных зерновых материалов / Н. О. Шандыба, М. П. Юхименко // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій. – Суми, 2011. – Ч. 1. – С. 120–121.

67. Pupinis G. Grain drying by use of changeable air flow method / G. Pupinis // *Agronomy Research*. – 2008. – № 6 (1). – P. 55–65.
68. Шандиба Н. О. Структурний аналіз втрат в технологічних процесах переробки сільськогосподарської продукції / Н. О. Шандиба, М. П. Юхименко // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини : збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Харків, 2011. – С. 101–102.
69. Бурдо О. Г. Пути повышения энергетической эффективности при сушке дисперсных продуктов / О. Г. Бурдо, Ю. А. Казмирук // *Проблемы региональной энергетики*. – 2008. – № 1. – С. 1–7.
70. Artyukhova N. A. Multistaged drying-classification apparatus of energy recovery / N. A. Artyukhova, N. P. Yukhimenko // *Материалы II Международной Казахстанско-Российской конференции по химии и химической технологии, посвященной 40-летию КарГУ имени академика Е. А. Букетова*. – Караганда, 2012. – Т. 1. С. 41–43.
71. Бурдо О. Г. Тенденції розвитку зерносушильної техніки / О. Г. Бурдо, О. В. Воскресенська, В. І. Донкоглов // *Зернові продукти і комбікорми*. – 2006. – № 2. – С. 48–53.
72. Бурдо О. Г. Сушити горох варто за економними технологіями / О. Г. Бурдо, І. В. Безбах, В. І. Донкоглов, Ю. О. Казмірук // *Зерно і хліб*. – 2007. – № 1. – С. 46–47.
73. Малин Н. И. Энергосберегающая сушка зерна / Малин Н. И. – М.: Колос, 2004. – 240 с.
74. Артюхова Н. О. Багатоступеневе сушіння дисперсних матеріалів у зваженому шарі в апаратах поличного типу / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // *Матеріали II Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції*. – Суми, 2012. – Ч. 2. – С. 148–149.
75. Кирпа М. Я. Прийоми енергозбереження в технології сушіння насіння кукурудзи / М. Я. Кирпа, Н. О. Пашенко // *Агроном : Науково-виробничий журнал*. – 2011. – № 3. – С. 86–89.

76. John S. Roberts. Drying kinetics of grape seeds / John S. Roberts, David R. Kidd, Olga Padilla-Zakour // *Journal of Food Engineering*. – 2008. – № 89. – P. 460–465.
77. 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.
78. Rudobashta S. P. Investigation of the heat- and mass transfer at convective drying of capillary porous materials in a stationary layer / S. P. Rudobashta, A. G. Zlobin // *Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*. – 1997. – P. 335–341.
79. Нагорнов С. А. Разработка методов расчёта процессов и создание оборудования для переработки изделий в псевдооживленных и циркуляционных средах: дисс. ...доктора. техн. наук: 05.17.08 / Нагорнов Станислав Александрович. – Тамбов, 2004. – 424 с.
80. Кирсанов В. А. Научные основы и принципы совершенствования процессов и аппаратов каскадной пневмокласификации сыпучих материалов: дисс. ... доктора техн. наук: 05.17.08 / Кирсанов Виктор Александрович. – Новочеркасск, 2005. – 391 с.
81. Barsky E. Master curve of separation processes / E. Barsky, M. Barsky // *Physical Separation in Science in Engineering*. – 2004. – Vol. 13, № 1. – P. 1–13.
82. Артюхова Н. О. Гравітаційні полицні апарати для сушіння зернистих матеріалів / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко, М. О. Кочергін // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. – 2012. – № 17 (188). – С. 234–239.
83. Юхименко Н. П. Производство калийных минеральных удобрений. Сушка и обеспыливание хлорида калия / Н. П. Юхименко, С. В. Вакал // *Хімічна промисловість України*. – 2014. – № 3. – С. 59–61.
84. Юхименко Н. П. Сушка термолабильных пищевых и зерновых продуктов в аппаратах взвешенного слоя / Н. П. Юхименко // *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія "Механізація та автоматизація виробничих процесів"*. – 2008. – № 3 (19). – С. 107–111.

85. Юхименко Н. П. Аммонизированный суперфосфат. Основные направления энергосбережения при классификации и охлаждении / Н. П. Юхименко, С. В. Вакал // Хімічна промисловість України. – 2009. – № 6. – С. 50–52.
86. Донат Е. В. Аппарат с наклонными перфорированными полками для обеспыливания подсыпочных материалов / Е. В. Донат, В. Д. Вернидуб, В. А. Кирсанов и др. // Цветные металлы. – 1977. – № 4. – С. 44–46.
87. Barsky E., Buikis M. Evaluation of the quality of cascade separation processes / 13th International Conference on Mathematical Modelling and Analysis & 3rd International Conference on Approximation Methods and Orthogonal Expansions. – Tartu, 2008. – P. 1–10.
88. КОМПАС-3D V 11 / Аскон. – 2009. – <http://www.ascon.ru>.
89. ANSYS 12.1 / ANSYS INC. – 2009. – ansys.com.
90. Дейч М. Е. Газодинамика двухфазных сред / М. Е. Дейч, Г. А. Филиппов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 472 с.
91. Лыков М. В. Сушка в химической промышленности / Лыков М. В. – М.: Химия, 1970. – 430 с.
92. WxMaxima 5.29.0 / Macsyms group at Project MAC. – 2012. – <http://maxima.sourceforge.net/>.
93. Артюхова Н. О. Експериментальне дослідження гідродинаміки руху потоків на каскаді полиць у багатоступінчастих гравітаційних сушарках / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2013. – № 1. – С. 42–51.
94. Повх И. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / Повх И. Л. – Л.: Машиностроение, 1974. – 480 с.
95. Пен Р. З. Планирование эксперимента в Statgraphics / Пен Р. З. – Красноярск: СибГТУ – Кларетианум, 2003. – 246 с.
96. 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.

97. Батунер Л. М. Математические методы в химической технике / Л. М. Батунер, М. Е. Позин. – Л.: Химия, 1971. – 824 с.
98. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Шенк Х.; пер. с англ. Коваленко Е.Г. – М.: Мир, 1972. – 381 с.
99. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента / Н. Джонсон, Ф. Лион; пер. с англ. Э. К. Лецкого, Е.В. Марковой. – М.: Мир, 1972. – Т.2. – 516 с.
100. Винарский М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – К.: Техніка, 1975. – 168 с.
101. Манасян С. К. Принципы конвективной сушки зерна / С. К. Манасян // Вестник КрасГАУ. – 2008. – № 6. – С. 145–150.
102. Лыков А. В. Теория переноса энергии и вещества / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – Минск: Издательство АН БССР, 1959. – 332 с.
103. Camelia Gavrilă. Heat and Mass Transfer in Convective Drying Processes / Camelia Gavrilă, Adrian Gabriel Ghiaus, Ion Gruia // Proceedings of the European Comsol Conference. – Hannover, 2008. – P. 21–24.
104. Коновалов В. И. Современные вопросы теории переноса при сушке / В. И. Коновалов, Т. Кудра, Н. Ц. Гатапова // Вестник ТГТУ. – 2008. – Т. 14, № 3. – С. 538–559.
105. Авдеев А. В. Моделирование процесса и режимов конвективной сушки зерна / А. В. Авдеев, Д. С. Начинов, А. А. Начинова // Вестник Орловского государственного аграрного университета. – 2009. – № 1(16). – С. 39–43.
106. Naghashzadegan M. A study of heat and mass transfer during drying of wood with particular consideration on the physical parameters / M. Naghashzadegan, A. K. Haghi, N. Amanifard, Sh. Rahrovan // Wseas journal on heat transfer and thermal engineering. – 2006. – Vol. 2 – P. 44–49.
107. Metzger Thomas. Modern modelling methods in drying / Thomas Metzger, Marzena Kwapińska, Mirko Peglow, Gabriela Saage, Evangelos Tsotsas // Drying of Porous Materials. – 2007. – Volume 66(1–2). – P. 103–120.

108. Бойков Л. М. Совершенствование тепломассопереноса при сервисном обслуживании установок сушки пористых волокнистых материалов / Л. М. Бойков, Н. С. Нечаев // Технично-технологические проблемы сервиса. – 2009. – № 2 (8). – С. 35–38.
109. Makkawi, Yassir T. Mass Transfer in Fluidized Bed Drying of Moist Particulate / Yassir T. Makkawi, Raffaella Ocone // Mass Transfer in Multiphase Systems and its Applications Edited by Mohamed El-Amin. – InTech, 2011. – 780 p.
110. Ермолаев В. В. Анализ кинетики обезвоживания препарата «бифидумбактерин» / В. В. Ермолаев, Ю. И. Алексанян, А. В. Ревина // Вестник АГТУ. – 2008. – № 2 (43). – С. 211–214.
111. Алексанян И. Ю. Исследование процессов сушки гранулированных продуктов растительного происхождения / И. Ю. Алексанян, С. Б. Попова, С. В. Синяк // Вестник АГТУ. – 2004. – № 2. – С. 215–224.
112. Кафаров В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.
113. Шандиба Н. Методика рекурентного розрахунку поличної гравітаційної сушарки сипких матеріалів / Н. Шандиба, М. Юхименко // Тринадцята наукова конференція «Львівські хімічні читання – 2011». – Львів, 2011. – С. У39.
114. Артюхова Н. О. Математична модель кінетики сушіння зернистих матеріалів у гравітаційних поличних апаратах / Н. О. Артюхова, М.П. Юхименко // I Міжнародна науково-технічна конференція «Хімічна технологія: наука та виробництво»: збірник тез доповідей. – Шостка, 2012. – С. 99.
115. Лыков А. В. Тепломассобмен: Справочник / Лыков А. В. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.
116. Srinivasakannan C. Evaluation Kinetic Parameters for Drying of Granular Material in Fluidized Bed / C. Srinivasakannan, N. Balasubramaniam // Canadian Journal on Chemical Engineering & Technology. – 2011. – Vol. 2, No. 5. – P. 65–86.

117. Лебедев В. В. Сушка зернистых материалов в аппарате с модифицированным вихревым слоем: дисс. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Лебедев Валерий Валентинович. – Тверь, 2007. – 121 с.
118. Федяев Александр А. Математическое моделирование динамики процессов тепловлажностной обработки капиллярно-пористых коллоидных дискретных материалов / Александр А. Федяев, Валентина Н. Федяева, Юрий В. Видин // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2008. – Ч. 1. – С. 68–75.
119. Фролов В. Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов / Фролов В. Ф. – Л.: Химия, 1987. – 208 с.
120. Иванов В. Е. Сушка дисперсных материалов в сушилке кипящего слоя непрерывного действия: дисс. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Иванов Виталий Евгеньевич. – Иваново, 2010. – 121 с.
121. Юдаев Б. Н. Теплопередача / Юдаев Б. Н. – М.: Высшая школа, 1981. – 319 с.
122. Лыков А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
123. Шрайбер А. А. Гидромеханика двухкомпонентных потоков с твёрдым полидисперсным веществом / Шрайбер А. А., Милютин В. Н., Яценко В. П. – К.: Наукова думка, 1980. – 252 с.
124. Тодес О. М. Аппараты с кипящим зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы / О. М. Тодес, О. Б. Цитович – Л.: Химия, 1981. – 295 с.
125. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука, 1987. – Ч.1 – 464 с.
126. Hiltunen K. Multiphase Flow Dynamics. Theory and Numerics / Hiltunen K., Jäsberg A., Kallio S. – Helsinki: Edita Prima Oy, 2009. – 113 p.
127. Khanali M. Study of Residence Time Distribution of Rough Rice in a Plug Flow Fluid Bed Dryer / M. Khanali , S.Rafiee, A. Jafari at all. // International Journal of Advanced Science and Technology. – 2012. –Vol. 48. – P. 103–114.

128. Renaud M. Influence of solids moisture content on the mean residence time in a rotary dryer / M. Renaud, J. Thibault, P. Alvarez // *Drying Technology*. – 2001. – Vol. 1. – P. 2131–2150.
129. Crowe C. T. *Multiphase flow handbook* / C. T. Crowe – Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006. – 1128 p.
130. Горбис З. Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков / Горбис З. Р. – М.: Энергия, 1970. – 424 с.
131. Setty Y. P. Drying of Solids in a Circulating Fluidized Bed / Y. P. Setty, G. V. Kumar, G. Srinivas // *The IUP Journal of Chemical Engineering*. – 2011. – Vol. III, No. 4. – P. 7–16.
132. Batchelor G. K. Sedimentation in a dilute dispersion of spheres // *J. Fluid Mech.* – 1972. – № 52. – P. 245–268.
133. Гольдштик М. А. Элементарная теория кипящего слоя / М. А. Гольдштик // ПМТФ. – 1972. – № 6. – С. 106–112.
134. Годунов С. К. Элементы механики сплошных сред и законы сохранения / С. К. Годунов, Е. И. Роменский – М.: Научная книга, 1998. – 280 с.
135. Артюхова Н. О. Визначення аеродинамічних характеристик гравітаційної поличної сушарки / Н. О. Артюхова // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». – 2012. – № 6 (24). – С. 76–81.
136. Синявин А. А. Расчётно-экспериментальное исследование взаимодействия газовых потоков с проницаемыми границами: дисс. ...канд. физ.-мат. наук: 01.02.05 / Синявин Алексей Александрович. – Москва, 2009. – 113 с.
137. Идельчик И. Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов / Идельчик И. Е. – М.: Машиностроение, 1983. – 351 с.
138. Шевелев Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных, пластмассовых и стеклянных водопроводных труб. Изд. 5-е, доп. / Шевелев Ф. А. – М.: Стройиздат, 1973. – 112 с.

139. Шандиба Н. О. Методика рекурентного розрахунку гравітаційної поличної сушарки / Н. О. Шандиба, М. П. Юхименко // Наукові праці ОНАХТ. – 2011. – Вип. 39, Т. 2. – С. 44–48.
140. Романков П. Г. Экстрагирование из твердых материалов / П. Г. Романков, М. И. Курочкина – Л.: Химия, 1983. – 256 с.
141. Sherwood Thomas K. Mass transfer / Sherwood Thomas K., Pigford Robert L., Wilke Charles R. – Tokyo: McGraw-Hill Book Company, 1975. – 677 p.
142. Теория и техника теплофизического эксперимента / [Гортышов Ю. Ф., Дресвянников Ф. Н., Идиатуллин и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 360 с.
143. Артюхова Н. О. Застосування температурно-вологісної апроксимації в розрахунках багатоступеневих сушарок / Н. О. Артюхова // Таврійський державний агротехнологічний університет. – 2013. – Вип. 13, Т. 1. – С. 87–95.
144. Шандиба О. Б. Оптимізація технологічних характеристик багатоступеневої гравітаційної сушарки / О. Б. Шандиба, Н. О. Артюхова // VIII Міжнародна науково-практична конференція «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення». – Алушта 2012. – Т. 2. – С. 282–285.
145. Артюхова Н. О. Експериментальне дослідження гідродинаміки робочого простору багатоступеневої гравітаційної поличної сушарки / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів фак-ту технічних систем та енергоефективних технологій. – Суми, 2013. – Ч. 2. – С. 141.
146. Артюхова Н. А. Повышение эффективности обработки зернистых материалов во взвешенном слое / Н. А. Артюхова, А. Е. Артюхов // Инновационные технологии в производстве, науке и образовании: сборник трудов II Международной научно-практической конференции. – Махачкала, 2012. – Ч. 2. – С. 49–55.
147. Rodríguez-Rojo S. Hydrodynamic Modeling of Supercritical Fluidized Bed: Eulerian Approach / S. Rodríguez-Rojo, J. Sierra-Pallarés, T. Parra-Santos, F.

- Castro, M.J. Cocero // 9th International Symposium on Supercritical Fluids 2009. – Arcachon, 2009. – Volume 1. – P. 591–593.
148. Артюхова Н. О. Визначення оптимальної конструкції та раціонального режиму роботи гравітаційних поличних сушарок / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // Хімічна промисловість України. – 2013. – № 3 (116). – С. 62–67.
149. Володин В. П. Экструзия профильных изделий из термопластов / Володин В. П. – Спб.: Профессия, 2005. – 480 с.
150. Artyukhova N. Simulation of the particle motion in devices with vertical sectioning of workspace / N. Artyukhova, M. Yuhimenko, O. Shandyba, A. Artyukhov // Ukrainian Food Journal. – 2014. – Vol. 3, issue 3. – P. 446–453.
151. Атаманюк В. М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів / В. М. Атаманюк, Я. М. Гумницький. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 276 с.
152. Артюхова Н. О. Експериментальне дослідження кінетики видалення вологи з зернистих матеріалів в багатоступеневій гравітаційній поличній сушарці / Н. О. Артюхова // Наукові праці ОНАХТ. – 2014. – Вип. 45, Т. 3. – С. 146–149.
153. Džiugys A. Numerical simulation of mixing and segregation of granular material / A. Džiugys, R. Navakas, A. Šlančiauskas, G. Stravinskas, R. Kačianauskas // Mechanika. – 2005. – Vol. 3 (53). – P. 52–56.
154. Artyukhov A. E. Application of computer simulation for the description of devices with suspended layer hydrodynamics / A. E. Artyukhov, N. A. Artyukhova // Actual problems of ICT specialists' training International scientific conference. – Khmel'nitsky, 2013. – Vol. 2. – P. 124–128.
155. Артюхова Н. О. Вдосконалення гідродинаміки руху потоків в гравітаційних поличних сушарках / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // Наукові праці ОНАХТ. – 2013. – Вип. 43, Т. 1. – С. 94–97.
156. Пат. 74070 Україна, МПК F 26 В 3/02, F 26 В 17/12. Пристрій для сушіння дисперсних матеріалів / Артюхова Н. О., Юхименко М. П., Артюхов А. Є., Шандиба О. Б.; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – № u201205954; заявл. 16.05.2012; надрук. 10.10.2012, Бюл. № 19.

157. Пат. 81720 Україна МПК F 26 B3/02, F 26 B17/12. Пристрій для сушіння дисперсних матеріалів / Артюхова Н. О., Юхименко М. П., Артюхов А. Є., Шандиба О. Б.; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – № u201300468; заявл. 14.01.2013; надрук. 10.07.2013, Бюл. № 13.
158. Пат. 92423 Україна, МПК F 26 B 3/02, F 26 B 17/12. Пристрій для сушіння дисперсних матеріалів / Артюхов А. Є., Артюхова Н. О., Шандиба О. Б.; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – № u201403403; заявл. 03.04.2014; надрук. 11.08.2014, Бюл. № 15.
159. Артюхова Н. О. Вдосконалення конструкції поличних контактів багатоступеневих гравітаційних сушарок / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали III Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції. – Суми, 2014. – Ч. 2. – С. 91.
160. Артюхова Н. О. Розробка методики інженерного розрахунку гравітаційних поличних сушарок / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // XIV Наукова конференція «Львівські хімічні читання – 2013». – Львів, 2013. – С. У83.
161. Расчёт оборудования для гранулирования минеральных удобрений / [Генералов М. Б., Классен П. В., Степанова А. Р., Шомин И. П.]. – М.: Машиностроение, 1984. – 192 с.
162. Классен П. В. Основы техники гранулирования (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) / П. В. Классен, И. Г. Гришаев. – М.: Химия, 1982. – 272 с.
163. Артюхова Н. О. Обґрунтування методики визначення енергоефективності гравітаційної поличної сушарки для зернистих матеріалів / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2014. – Т. 3. – С. 95–99.
164. Артюхова Н. О. Оптимізація процесу взаємодії дисперсних потоків в гравітаційних тепломасообмінних апаратах / Н.О. Артюхова, М.П. Юхименко // Технологія 2012 : матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Севе-родонецьк, 2012. – С. 159–160.
165. Руденко Н. Б. Использование поля СВЧ при рециркуляционной сушке зерна активным вентилярованием: автореф. дисс. на соискание науч. степени канд.

- техн. наук: спец. 05.20.02 – «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве» / Н. Б. Руденко. – Зерноград, 2011. – 19 с.
166. Артюхова Н. А. Оценка энергетической эффективности многоступенчатой конвективной сушки концентратов и минерального сырья / Н. А. Артюхова, А. Б. Шандыба, А. Е. Артюхов // Научный вестник Национального горного университета. – 2014. – № 1. – С. 92–98.
167. Артюхова Н. А. Опытнo-промышленное внедрение гравитационных полочных сушилок зернистых материалов / Н. А. Артюхова, Н. П. Юхименко // Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых.– Горки, 2013. – Ч. 1. – С. 232–234.
168. Артюхова Н. О. Вплив організації руху сушильного агента на якість сушіння матеріалів у гравітаційних полицних апаратах / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // Наукові праці ОНАХТ. – 2012. – Вип. 41, Т. 2. – С. 233–237.
169. А. с. "Multistage heat treatment" / Артюхова Н. О., Юхименко М. П., Артюхов А. Є.; свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 57043. – 17.10.2014.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1. – Дані до визначення кінетичного параметру K_t для нагрівання матеріалу.

Значення $-\ln\left(\frac{t_m - t_{m.поч}}{t_{суш.поч} - t_{m.поч}}\right)$	Час нагрівання τ , хв
0	0
1,2	4,5
1,0	9,0
1,92	12
3,4	15,3
2,7	18
4,5	23,4
0,9	2,1
2,5	15
0,4	3
4,5	22,2

Таблиця А.1. – Дані до визначення кінетичного параметру K_u для сушіння матеріалу.

Значення $-\ln\frac{U_m - U_{суш.поч}}{U_{m.поч} - U_{суш.поч}}$	Час сушіння τ , хв
0	0
1,2	4,5
2,0	9,0
1,8	12,0
3,5	15,3
2,9	18,0
4,5	23,4
0,1	2,1
2,2	15,0
0,4	3,0
3,4	22,2

ДОДАТОК Б



Рис. Б.1 – Блок-схема інженерного розрахунку гравітаційних поличних сушарок з вертикальним секціонуванням робочого простору.

ДОДАТОК В

Програма «Multystage heat treatment»

Програма «Multystage heat treatment» призначена для розрахунку процесів термообробки та (за необхідності) зневоднення в багатоступневих сушильних, грануляційних та охолоджувальних апаратах зваженого шару. Результат розрахунку – значення температури та вологості дисперсного матеріалу та газового потоку (сушильного чи охолоджуючого агента) до та після кожного ступеня багатоступеневого апарата. Програма виводить дані розрахунку на екран (за необхідності – на друк) у вигляді переліку результатів або графічних залежностей.

Програма написана за допомогою програмного пакету wxMaxima – системи комп'ютерної алгебри та призначена для роботи в операційній системі Windows.

Ідентифікатори до програми розрахунку процесу термообробки у багатоступневому апараті наведені у таблиці Б.1.

Таблиця символічних імен для розрахунку в програмі «Multystage heat treatment»

Пояснення	«Multystage heat treatment»
початкова температура газового потоку (до входу на ступінь), °С (тут і далі $i=1,2,3\dots n$ – номер ступеню апарата)	$t1_{pi}$
кінцева температура газового потоку (після виходу зі ступеня), °С	$t1_{ki}$
початкова температура дисперсного матеріалу (до входу на ступінь), °С	$t2_{pi}$
кінцева температура дисперсного матеріалу (після виходу зі ступеня), °С	$t2_{ki}$
початкова вологість газового потоку (до входу на ступінь), масові долі	$x1_{pi}$
кінцева вологість газового потоку (після виходу зі ступеня), масові долі	$x1_{ki}$
початкова вологість дисперсного матеріалу (до входу на ступінь), масові долі	$x2_{pi}$
кінцева вологість дисперсного матеріалу (після виходу зі ступеня), масові долі	$x2_{ki}$
ефективність роботи ступеню (температурний показник), долі	$E1_i$
ефективність роботи ступеню (вологісний показник), долі	$E2_i$
витрата газового потоку в апараті, кг/с	$G1$
витрата дисперсного матеріалу в апараті, кг/с	$G2$
теплоємність дисперсного матеріалу, Дж/(кг·К)	C_m
теплоємність води, Дж/(кг·К)	C_v
теплоємність газового потоку, Дж/(кг·К)	C_c

Наступний крок - проведення розрахунку (рис. В.4). Відповідна команда дає можливість обрахувати шукані величини

```
rez:=solve({k1,k2,k3,k4},{t1k1,t2n1,x2n1,x1k1});
```

Рис.В.4 – Проведення розрахунку

В окремому вікні (рис. В.5) відображаються результати розрахунків

```
rez := {t1k2 = , t2n2 = , x1k2 = , x2n2 = }
```

Рис.В.5 – Результати розрахунку

Після проведення розрахунку першого ступеня користувач переходить до подальших обчислень. Рівняння математичної моделі на наступному ступені аналогічні попереднім. Особливість розрахунку на кожному наступному ступені – використання результатів обчислень характеристик потоків попереднього ступеню, які є початковими даними для розрахунку (рис. В.6).

```
t1n2:=t1k1;t2k2:=t2n1;x1n2:=x1k1;x2k2:=x2n1;
```

Рис.В.6 – Початкові дані для розрахунку ступеню термообробки

Процедура проведення розрахунків не відрізняється від описаної вище. Кількість ступенів апарата задається користувачем під час проведення розрахунку та не обмежена.

ДОДАТОК Г

Фермерське

«ЯКОВЛЄВА»

господарство

72202 смт. Веселе, вул.Леніна 133, ,Веселівський р-н, Запорізька обл. т 097 30 42 661.факс (06136)21719
ЕДРПО № 30996568, МФО 380805 ІПН 309965608053№ св-ва 200100198 Банківські реквізити: р/с №
26006222705, ПАТ «Райффайзен Банк АВАЛЬ»

№ 3

« 08 » січня 2013 р.

АКТ

про впровадження науково-технічних результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Артюхової Надії Олександрівни

Комісія у складі: голови ФГ «Яковлева» Яковлева О.Я., головного інженера ФГ «Яковлева» Колесова Є.В., проректора з наукової роботи СумДУ Черноуса А.М., зав. кафедри ПОХНВ СумДУ Склабінського В.І. та доцента кафедри ПОХНВ СумДУ Юхименка М.П. склали даний акт про те, що наукові результати, технологічні рекомендації та конструктивні параметри сушильного обладнання, запропоновані в дисертаційній роботі Н.О. Артюхової «Гідродинаміка і тепломасообмін при обробці зернистих матеріалів у поличних апаратах завислого шару», були впроваджені при конструюванні багатоступеневої гравітаційної поличної сушарки для сушіння зернових матеріалів (пшениці та соняшника).

Результати отримано під час виконання науково-дослідної роботи «Розробка та дослідження високоефективних апаратів для процесів масообміну, кристалізації та класифікації» (держ. реєстрація №0110U001953) кафедрою «Процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв» Сумського державного університету при участі аспірантки Н.О. Артюхової.

Серія проведених здобувачем експериментів як в лабораторних, так і у виробничих умовах відзначалась простими і в той же час оригінальними підходами, що дозволили виявити можливості раціонального використання сушильного агента із заданими характеристиками. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень на моделі дослідно-виробничої поличної сушарки запропонована рекурентна методика вибору оптимальних технологічних режимів багатоступеневого процесу в залежності від дисперсного складу та вологості зернового матеріалу.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи була реалізована в спеціальному конструктивному секціонуванні внутрішнього простору сушарки перфорованими полицями та організацією комбінованого руху взаємодіючих потоків зерна і сушильного агента. Завдяки проведенню диференційованого режиму сушіння було досягнуто підвищення швидкості та ефективності видалення вологи із зернових матеріалів.

В умовах фермерського господарства були проведені дослідницькі роботи по сушінню зерен пшениці та соняшника на дослідно-промисловому зразку багатоступеневої гравітаційної поличної сушарки. У результаті впровадження даної сушильної установки отримано наступні

показники:
кінцева вологість зерен соняшника складає 7,3% при її початковому значенні 12,2%;
кінцева вологість зерен пшениці складає 12,5% при її початковому значенні 16,1%.



Від СумДУ
Проректор з наукової роботи, д.ф.-м.н., проф.
Зав. кафедри ПОХНВ, д.т.н., проф.
Доцент кафедри ПОХНВ, к.т.н., доц.

О.Я. Яковлев
Є.В. Колесов

А.М. Черноус
В.І. Склабінський
М.П. Юхименко