

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**АРТЮХОВА Надія Олександрівна**

УДК 66.047.3-982

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

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Суми – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** – кандидат технічних наук, доцент  
**Юхименко Микола Петрович,**  
Сумський державний університет,  
доцент кафедри процесів та обладнання  
хімічних і нафтопереробних виробництв.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Атаманюк Володимир Михайлович,**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
завідувач кафедри хімічної інженерії;

кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Вакал Сергій Васильович,**  
Державне підприємство  
«Сумський державний науково-дослідний інститут  
мінеральних добрив і пігментів», директор.

Захист дисертації відбудеться «11» грудня 2015 р. об 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.04 при Сумському державному університеті (40007, Україна, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, ауд. Ц-204).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського державного університету (40007, Україна, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2).

Автореферат розіслано «27» жовтня 2015 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Л. Л. Гурець

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**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.

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. Використання зваженого шару характеризується рядом переваг, які відмічені у працях зарубіжних і вітчизняних науковців. 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. 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 багатоступневих апаратах зваженого шару;
- експериментальне дослідження гідродинаміки руху потоків у багатоступневих 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 протитечієм 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.*

**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 багатоступеневих 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 «Яковлєва», м. Мелітополь).

**Особистий внесок здобувача.** Особистий внесок здобувача полягає у: проведенні математичного моделювання з метою визначення гідродинамічних характеристик процесу сушіння у багатоступеневому 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 багатоступеневих апаратів поличного типу. Постановлення завдання та формулювання висновків проводилися під керівництвом 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.

**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 «Технологія» (м. Сєверодонецьк, 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. Хме-

льницький, 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.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми досліджень, зв'язок із науковими програмами, сформульовані мета і завдання досліджень, їх наукова новизна та практичне значення, наведено основні дані щодо апробації роботи, публікацій, подано загальну характеристику роботи.

У **першому розділі** на основі проведеного патентного пошуку та огляду літературних джерел проаналізовано сучасний стан та шляхи розвитку техніки і технології сушіння дисперсних матеріалів в апаратах зваженого шару. Проведено огляд основних гідродинамічних закономірностей проведення процесу сушіння у зваженому шарі, визначено особливості кінетики процесу сушіння. Розглянуто класифікацію сушарок зваженого шару за основними функціональними та конструктивними ознаками. На базі огляду сформульовано основні перспективи подальшого розвитку способів сушіння та виявлено можливість ефективного застосування поличних апаратів зваженого шару.

Узагальнення та зіставлення окремих результатів попередніх авторів у цій галузі дають можливість зменшити вплив факторів, що дестабілізують процес сушіння, запропонували нову конструкцію сушильних пристроїв зі стабільними гідро- й термодинамічними показниками шляхом вертикального секціонування внутрішнього простору за допомогою встановлення каскаду перфорованих полиць під деяким кутом.

У результаті доведено актуальність теми досліджень, визначено мету роботи та поставлено завдання створення комбінованих конструкцій апаратів з активним гідродинамічним режимом, під час якого інтенсифікація тепломасообміну досягається з мінімальними енерговитратами на підтримку зваженого шару, вдосконалено організацію руху потоків у робочому просторі апарата, отримано розрахункові залежності для визначення основних гідродинамічних та кінетичних характеристик потоків у поличній сушарці.

У **другому розділі** наведено загальну методику та основні методи досліджень, застосовані в дисертаційній роботі.

Математичне моделювання гідродинаміки руху потоків здійснювали на базі класичних положень механіки рідини та газу й технічної гідромеханіки; математич-

не моделювання кінетики сушіння проводили на базі положень теорії зневоднення під час конвективного сушіння. Розв'язування рівнянь математичної моделі здійснено за допомогою програмного комплексу комп'ютерної алгебри wxMaxima. Побудову теоретичних залежностей виконано диференціальними методами математичного аналізу та інтегрального обчислення.

Натурні експерименти підпорядковано меті зіставлення їх результатів і результатів теоретичних досліджень.

На етапі зіставлення результатів теоретичних та експериментальних досліджень із результатами комп'ютерного моделювання застосовано системи тривимірного твердотілого моделювання КОМПАС-3D (створення тривимірних моделей) та програмний продукт ANSYS (розрахунок чисельними методами).

Визначення похибки вимірів і результатів розрахунку основних гідродинамічних характеристик та закономірностей зміни температурно-вологісних характеристик дисперсного матеріалу та сушильного агента в процесі сушіння в об'ємі експериментального зразка поличного апарата базується на загальноприйнятих методиках та рекомендаціях щодо проведення інженерного експерименту та обробки одержаних даних.

У третьому розділі проведено опис гідродинамічних та кінетичних параметрів процесу сушіння дисперсних матеріалів у гравітаційних поличних апаратах. Загальна математична модель складається з окремих блоків. Кожний наступний блок математичної моделі є узагальнювальним щодо попереднього та враховує одержані в ньому параметри. Така структура дозволяє провести аналіз процесу сушіння від елементарного об'єму апарата до поступеневої зміни гідродинамічних і кінетичних параметрів та в кінцевому підсумку одержати математичний опис процесів, що відбуваються в усьому об'ємі апарата.

У першому блоці на основі рівнянь внутрішнього тепломасоперенесення, балансових рівнянь перенесення теплоти й вологи визначається інтенсивність передачі тепла від сушильного агента до поверхні одиночної дисперсної частинки за визначений час (1), час нагрівання (2) та сушіння дисперсних частинок у зваженому шарі (3):

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

де  $t_{нов}$ ,  $t_{м.поч}$ ,  $t_{суш.поч}$  – температура поверхні матеріалу, початкові температури матеріалу і сушильного агента відповідно, °C;  $A_n$ ,  $\mu_n$  – сталі коефіцієнти та корені характеристичного рівняння;  $\tau_n$  – час нагрівання, с;  $a_m$  – коефіцієнт теплопроводності, м<sup>2</sup>/с;  $R$  – характерний розмір дисперсного матеріалу, м;

$$\tau_n = -\frac{1}{K_t} \ln \frac{t_m - t_{м.поч}}{t_{суш.поч} - t_{м.поч}}, \quad (2)$$

де  $K_t = \frac{\alpha}{G_g \cdot c_u \cdot \rho_u} \cdot \frac{6(1-\varepsilon)}{d_u}$  – параметр, що характеризує швидкість нагрівання матеріалу з характерним розміром частинок  $d_u$ , 1/с;  $G_g$  – витратна концентрація, кг/кг;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $c_u$  – теплоємність матеріалу, Дж/(кг·К);  $\rho_u$  – густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  – порізність зваженого шару, доли;

$$\tau_c = -\frac{1}{K_u} \ln \frac{U_m - U_{суш.поч}}{U_{м.поч} - U_{суш.поч}}, \quad (3)$$

де  $K_u = \frac{\beta \cdot F_{ш}}{\rho_q}$  – кінетичний параметр вологовіддачі, 1/с;  $F_{ш}$  – питома поверхня частинок у шарі, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі, кг/м<sup>2</sup>·с.

У другому блоці математичної моделі на основі розрахунків гідродинамічних характеристик газового потоку визначаються час перебування частинки на полиці в умовах її вільного та стисненого руху, аеродинамічний опір поличної сушарки, середня швидкість вертикального потоку над отворами перфорації та епюри швидкостей газового потоку над полицею і в розвантажувальному зазорі.

Час руху частинки  $\tau_{инер}^{cm}$  уздовж полиці на  $i$ -му ступені можна визначити з рівняння

$$\tau_{инер}^{cm} = \frac{L_{пол}}{\Delta W_2 \sin \gamma}, \quad (4)$$

де  $L_{пол}$  – довжина полиці сушарки, м;  $\Delta W_2 = W_{22} - W_2$ , м/с ( $W_{22}$  – швидкість газового потоку, що відповідає режиму винесення дисперсного матеріалу;  $W_2$  – робоча швидкість газового потоку);  $\gamma$  – кут нахилу полиці до горизонту, град.

Урахувати явище обмеженого руху частинки та сили міжфазової взаємодії стає можливим при введенні коефіцієнта стисненості частинки  $\chi$ .

Час перебування частинки на полиці в умовах її стисненого руху

$$\tau_{инер}^{cm} = \frac{L_{пол} \cdot \chi}{\Delta W_2 \sin \gamma}. \quad (5)$$

Результати обчислення часу перебування окремої частинки на полиці за формулами (4) та (5) за різних умов представлено на рисунку 1.

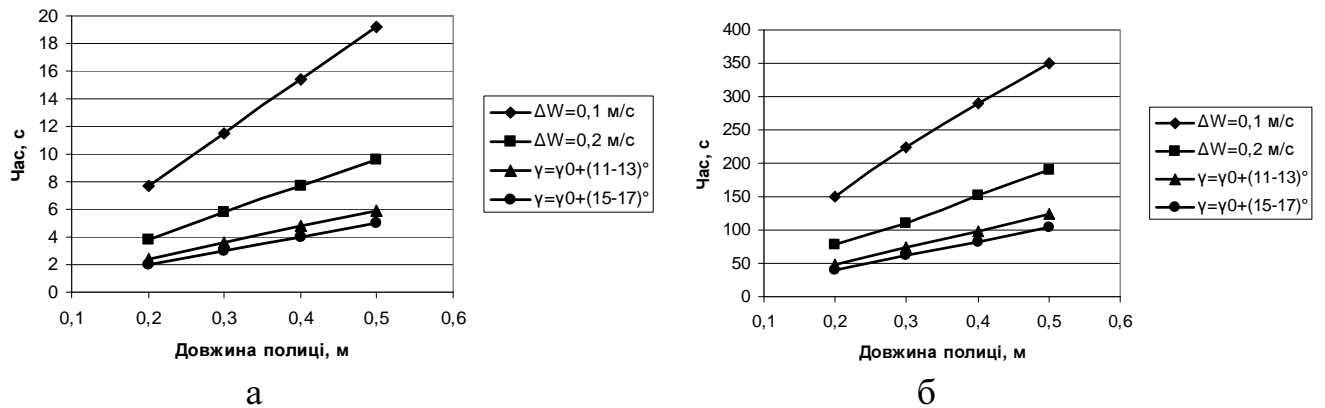


Рисунок 1 – Час перебування частинки на полиці: а – режим вільного руху; б – режим стисненого руху

Втрати тиску в межах одного ступеня сушарки  $\Delta p_i$  визначаються з рівняння

$$W_{21} \psi L_{пол} = \psi L_{пол} \sqrt{\frac{4d_q g (\rho_q - \rho_{сум})}{3 \cdot \varepsilon \cdot \zeta \cdot \rho_2}} = \frac{2\phi\psi}{3z\sqrt{\rho_2}} \left( \sqrt{\Delta p_i^3} - \sqrt{(\Delta p_i - zL_{пол})^3} \right), \quad (6)$$

де  $W_{21}$  – швидкість газового потоку, що підтримує частинку у зваженому стані, м/с;  $\rho_{сум}$  – густина двофазної системи «тверде-газ», кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_2$  – густина газового



поток,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\zeta$  – коефіцієнт опору частинки дії висхідного газового потоку;  $\psi$  – ступінь перфорації полиці (вільний переріз полиці), %;  $z$  – коефіцієнт питомих втрат тиску по довжині полиці,  $\text{Па/м}$ ;  $\varphi$  – коефіцієнт швидкості.

Середня швидкість вертикального потоку над отворами перфорації

$$W_z = \overline{W}_0 = \psi \cdot W_0 = \psi \varphi \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_i - zX}{\rho_z}}, \quad (7)$$

де  $X$  – поточна координата за довжиною апарата, м.

Третій блок моделі – рекурентний розрахунок процесу видалення вологи з матеріалу в об'ємі всього апарата (за схемою, поданою на рисунку 2). В цьому блоці визначається ефективність кожного зі ступенів гравітаційної полицної сушарки залежно від необхідного часу перебування та інтенсивності зневоднення, а також 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 прогріву матеріалу, гідродинамічні характеристики сушильного агента і дисперсного матеріалу) є вихідними для визначення максимальної ефективності кожного зі ступенів сушіння в межах полицного апарата.

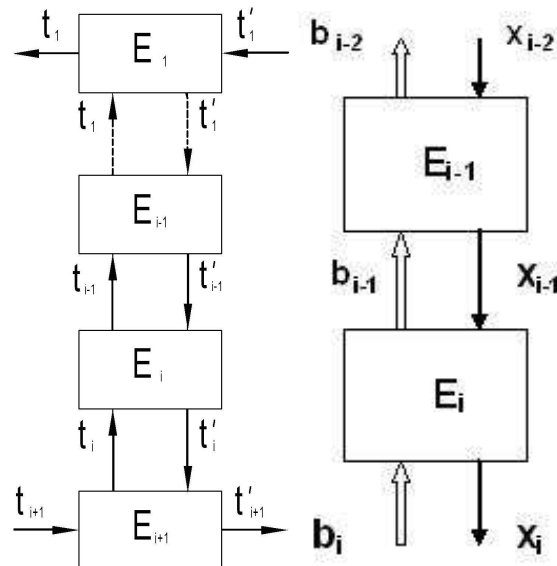


Рисунок 2 – Розрахункова схема до методики рекурентного розрахунку процесу сушіння

Кінетика процесу стосовно температур для  $i$ -го ступеня сушіння

$$\frac{t_{i-1} - t'_i}{t_i - t'_{i-1}} = \exp(-A\tau), \quad (8)$$

де  $A$  – кінетичний температурний параметр процесу;  $t'_i$ ,  $t_i$  – температури матеріалу та сушильного агента в  $i$ -му ступені сушарки відповідно,  $^{\circ}\text{C}$ .

Кінетика перенесення водяної пари:

$$\frac{x_i - b_{i-1}}{x_{i-1} - b_i} = \exp(-B\tau), \quad (9)$$

де  $B$  – кінетичний параметр перенесення вологи;  $x_i$ ,  $b_i$  – вологість матеріалу та сушильного агента в  $i$ -му ступені сушарки відповідно,  $\text{кг/кг}$ .

Рівняння теплового балансу потоків дисперсного матеріалу та сушильного агента

$$G_m c_m (t'_i - t'_{i-1}) + G_m c_g (x_i t'_i - x_{i-1} t'_{i-1}) = G_{суш} c_g (t_i - t_{i-1}) + G_{суш} c_g (b_i t_i - b_{i-1} t_{i-1}), \quad (10)$$

де  $G_m, G_{суш}$  – витрати сухого матеріалу та сушильного агента відповідно, кг/с;  $c_g, c_g$  – теплоємність води та газу (повітря) відповідно, Дж/(кг·К).

Рівняння матеріального балансу вологості потоків матеріалу та сушильного агента, що взаємодіють у протитечійному режимі:

$$G_m (x_{i-1} - x_i) = G_{суш} (b_{i-1} - b_i). \quad (11)$$

Ефективність сушіння, що враховує інтенсивність видалення вологи та співвідношення витрат потоків:

$$E_i = \frac{x_{i-1} - x_i}{x_{i-1} - b_i} = \frac{1 - \exp[-B_i \tau_i (1 + G_i^{-1})]}{1 + G_i^{-1}} \quad (12)$$

У чисельнику – різниця вологості матеріалу до та після сушіння (фактична), у знаменнику – максимальна різниця вологості матеріалу та сушильного агента (рушійна сила процесу), де  $G_i^{-1} = \frac{G_m}{G_{суш}}$  – співвідношення витрат дисперсного матеріалу, який висушують, до витрати сушильного агента на  $i$ -му ступені сушарки.

У четвертому розділі подано результати експериментальних досліджень із установлення впливу технологічних (витрата, швидкість руху газового потоку, організація руху потоків) і конструктивних (геометричних розмірів, конфігурації окремих елементів пристрою) параметрів на гідродинаміку потоків у робочому просторі полицної сушарки та кінетику видалення вологи з дисперсного матеріалу. Одержано критеріальну залежність, що дозволяє прогнозувати значення коефіцієнта масовіддачі під час сушіння в гравітаційних полицних сушарках.

Витрата сушильного агента складає 0,007–0,013 м<sup>3</sup>/с, витрата матеріалу – 0,003–0,004 кг/с. Модельні матеріали для вивчення гідродинаміки: 75 % поліпропілену ( $d_u = 3\text{--}3,5$  мм, вологість матеріалу  $x = 1,7$  %) та 25 % аміачної селітри ( $d_u = 2\text{--}2,5$  мм,  $x = 0,2$  %), суміш цих матеріалів. Модельний матеріал для дослідження кінетики видалення вологи з дисперсного матеріалу – поліпропілен ( $d_u = 3\text{--}3,5$  мм,  $x_{ноч} = 13$  %, значення  $x_{кін}$  залежить від технологічних і конструктивних характеристик сушарки та коливається від 5 до 8 %).

Якісна картина розподілення швидкості руху газового потоку в надполичному просторі та розвантажувальному зазорі має вигляд, поданий на рисунку 3. Довжина зони I визначається довжиною полицного контакту та кутом його встановлення. Закон розподілення швидкості в цій зоні залежить від величини вільного перерізу полиці, її довжини, кута встановлення і витрат газового потоку. Довжина зони II визначається величиною розвантажувального зазору, закон розподілення швидкості в ній залежить від конструкції полицного контакту та витрат газового потоку.

Епюра розподілення швидкості руху газового потоку по довжині апарата залежно від величини розвантажувального зазору, що наведена на рисунку 4 ( $X/L$  – відношення довжини розвантажувального зазору до довжини апарата;  $H$  – висота встановлення полицного контакту;  $\gamma$  – кут нахилу полицного контакту до горизонту;

$\gamma_0$  – кут природного відкосу матеріалу), має такі особливості: низхідний характер від стінки апарату до кінця поличного контакту, що обумовлено різним перепадом по довжині тисків під поличним контактом і над ним; зменшення величини розвантажувального зазору призводить до збільшення інтенсивності вихрив 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.

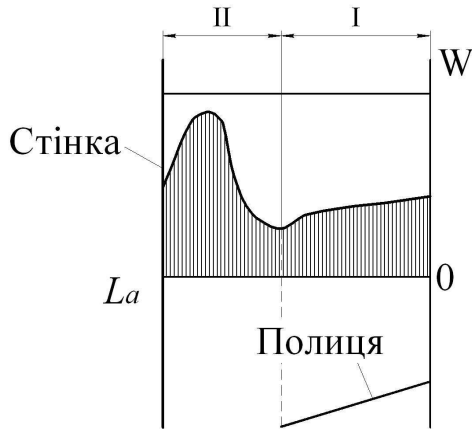


Рисунок 3 – Епюра розподілення швидкості руху газового потоку по довжині апарату

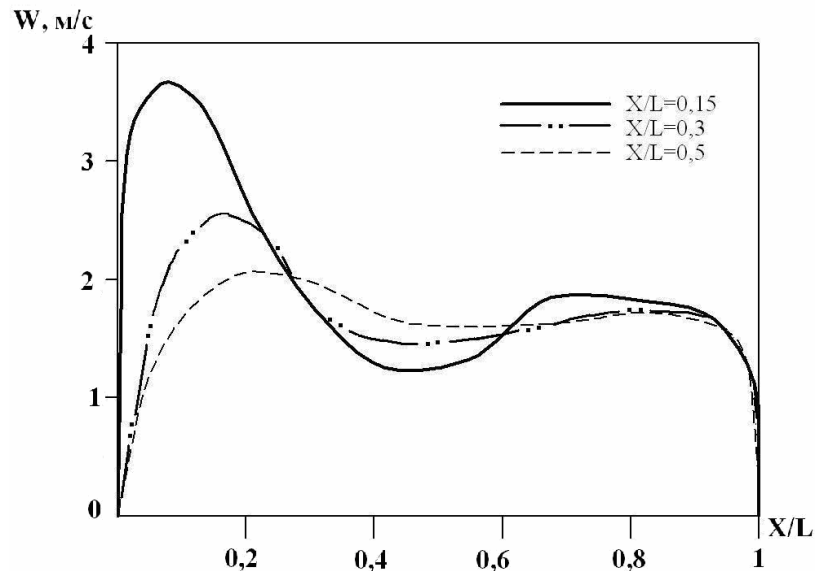


Рисунок 4 – Епюра розподілення швидкості руху газового потоку по довжині апарату залежно від  $X/L$  при  $H = 0,25$  м,  $\psi = 15$  % та  $\gamma = \gamma_0 + (11-13)^\circ$

Аналіз результатів експерименту стосовно розподілення швидкості руху газового потоку на різних ступенях сушарки залежно від висоти їх установаження при однаковому конструктивному виконанні кожного ступеня дозволив виявити такі закономірності: 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, що 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) частково вирівнюється профіль швидкості руху газового потоку на поличному контакті; спостерігається зменшення піку швидкості руху газового потоку в розвантажувальному зазорі.

При зменшенні кута встановлення поличного контакту при постійному значенні зазору 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.

На рисунку 5 наведено результати визначення експериментального часу перебування частинки на полиці в режимі її одиночного та стисненого руху залежно від кута нахилу полиці, її довжини та різниці швидкостей  $\Delta W_2$ .

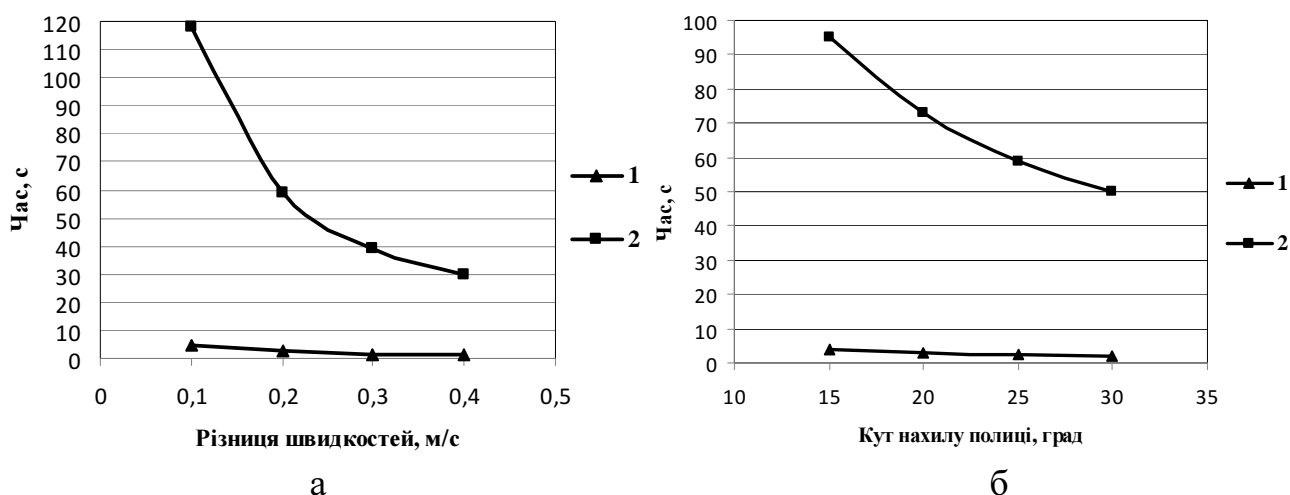


Рисунок 5 – Час перебування дисперсного матеріалу на полиці довжиною  $L = 0,12$  м: а –  $\gamma = \gamma_0 + (11-13)^\circ$ ; б –  $\Delta W_z = 0,2$  м/с; 1 – режим вільного руху; 2 – режим стисненого руху

Графічна залежність  $Sh / Sc^{0,33} = f(Re)$  для визначення коефіцієнта  $A_1$  та ступеня  $m$  у рівнянні вигляду  $Sh = A_1 \cdot Sc^n \cdot Re^m$  наведена на рисунку 6. Значення коефіцієнта  $n$  дорівнює 0,33 для випадку, коли параметри сушильного агента змінювались упродовж експерименту незначно.

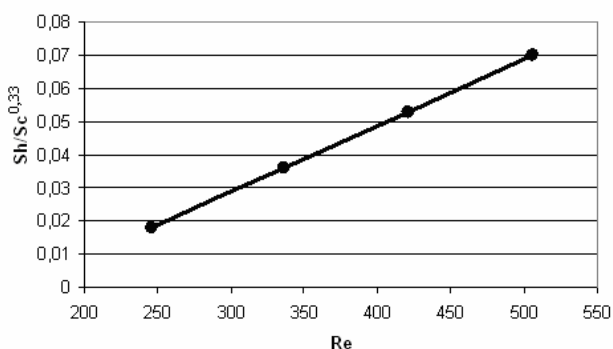


Рисунок 6 – Графічна залежність  $Sh / Sc^{0,33} = f(Re)$  для визначення коефіцієнта  $A_1$  та ступеня  $m$

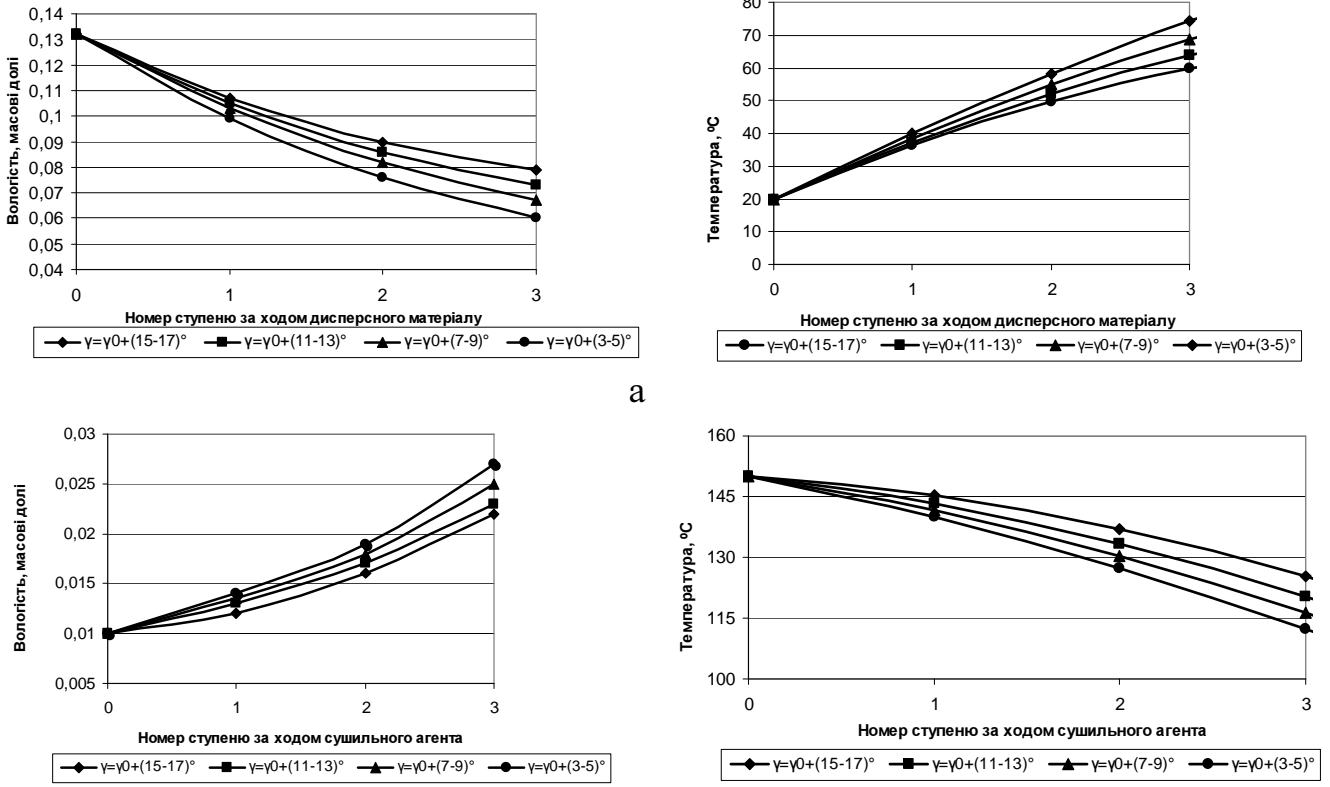
Тоді критеріальне рівняння процесу сушіння поліпропілену набере вигляду:

$$Sh = 0,008 \cdot Sc^{0,33} \cdot Re^{0,47} \quad (13)$$

Установлено закон зміни вологості й температури дисперсного матеріалу та сушильного агента на ступенях каскаду полиць залежно від конструкції полиці, початкової температури сушильного агента, організації його руху та співвідношен-

ня витрат сушильного агента і дисперсного матеріалу. Як приклад наведено результати дослідження впливу кута нахилу полиці на характеристики дисперсного матеріалу, сушильного агента та ефективність процесу сушіння, які зображені на рисунках 7, 8 ( $d_{відн}$  – діаметр, віднесений до фіксованого діаметра отворів полицного контакту  $d_{отв}$ ).

У п'ятому розділі проведено аналіз одержаних теоретичних та експериментальних результатів. Аналіз закону зміни гідродинамічних характеристик сушильного агента, вологості й температури потоків, обчислених теоретично та одержаних за даними експериментальних досліджень, виявив, що за різних початкових умов у характері теоретичних та експериментальних кривих простежується одна й та сама якісна закономірність, але кількісна характеристика дещо не збігається (рисунок 9). Значення гідродинамічних і кінетичних характеристик, одержаних за результатами аналітичного розв'язання, та експериментальні дані мають високий ступінь відповідності. Відмінність у кількісній характеристиці для всіх випадків пояснюється ідентичними причинами, тому аналіз та зіставлення одержаних результатів будуть проводитися під час дослідження впливу зміни довільно обраного параметра.



а

б

Рисунок 7 – Вплив кута нахилу полиці на зміну вмісту вологи і температури: а – в дисперсному матеріалі; б – у сушильному агенті ( $X/L = 0,3$ ;  $\psi = 20\%$ ;  $d_{відн} = d_{отв}$ ;  $G_{суш}/G_M = 2$ )

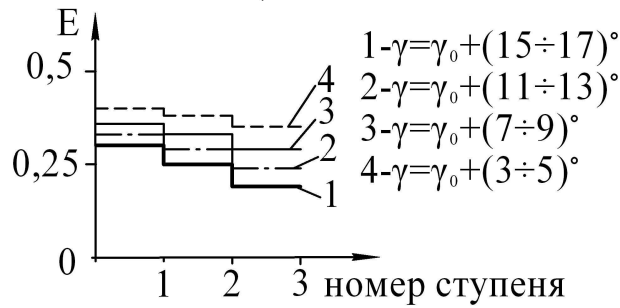


Рисунок 8 – Вплив кута нахилу полиці на ефективність процесу сушіння ( $X/L = 0,3$ ;  $\psi = 20\%$ ;  $d_{відн} = d_{отв}$ ;  $G_{суш}/G_M = 2$ )

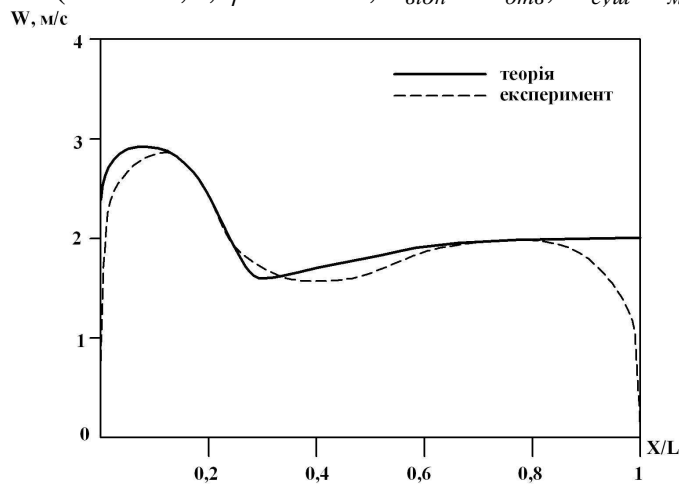


Рисунок 9 – Епюра розподілення швидкості руху газового потоку по довжині апарата при  $X/L = 0,15$ ,  $\gamma = \gamma_0 + (7-9)^\circ$ ,  $H = 0,25$  м

Зіставлення результатів теоретичного розрахунку часу перебування частинки на полиці та експериментального визначення цього показника (для випадку стисненого руху дисперсних частинок) залежно від кута нахилу полиці та різниці швидкостей дає задовільний результат (рисунки 10, 11).

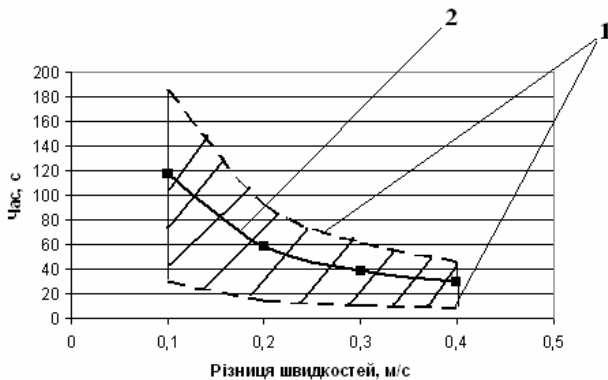


Рисунок 10 – Час перебування дисперсного матеріалу на полиці довжиною  $L_{\text{пол}} = 0,12$  м (стиснений рух частинок),  $\gamma = \gamma_0 + (11-13)^\circ$ : 1 – діапазон теоретичного розрахунку; 2 – експериментальні дані

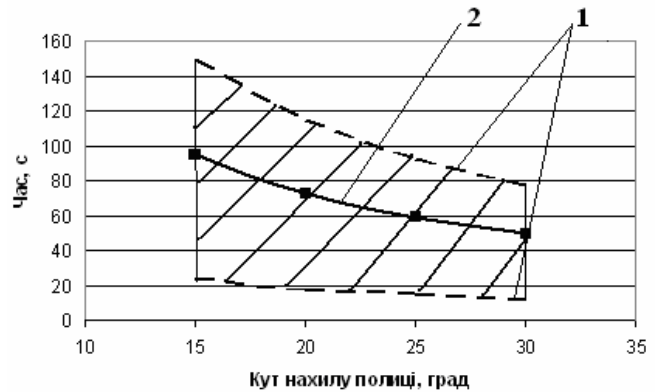


Рисунок 11 – Час перебування дисперсного матеріалу на полиці довжиною  $L_{\text{пол}} = 0,12$  м (стиснений рух частинок),  $\Delta W_z = 0,2$  м/с: 1 – діапазон теоретичного розрахунку; 2 – експериментальні дані

На рисунку 12 наведено дані експериментальних досліджень часу перебування дисперсної частинки на полиці в режимі стисненого руху з огляду на режим роботи гравітаційної полицної сушарки.

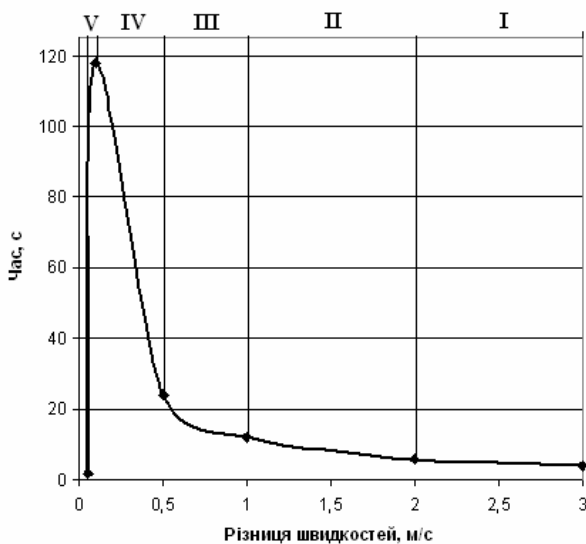


Рисунок 12 – Дані експериментальних досліджень часу перебування дисперсної частинки на полиці в режимі стисненого руху. Режими: I – режим гравітаційного падаючого шару; II – перший перехідний режим; III – режим зваженого шару; IV – другий перехідний режим; V – режим винесення дисперсного матеріалу

Результати досліджень свідчать про різке збільшення часу перебування дисперсної частинки на полиці під час переходу до режиму зваженого шару (зона III) та наближення до нуля часу перебування частинки на полиці у разі досягнення сушильним агентом другої критичної швидкості (винесення частинок із зваженого шару, зона V).

Зіставлення результатів математичного моделювання та експериментальних досліджень зміни температурно-вологісних характеристик потоків показало, що інтенсивність зневоднення дисперсного матеріалу (зволоження сушильного агента) та його нагрівання (охолодження сушильного агента) вища на 5–6 % у разі теоретичного розрахунку. Це обумовлено такими чинниками:

- втратою тепла крізь теплоізоляцію полицної сушарки;
- відмінністю експериментальних

полів швидкості сушильного агента на окремих полицях каскаду при їх однаковому конструктивному виконанні.

Результати аналізу даних математичного моделювання та експериментальних досліджень дозволили побудувати криву сушіння для модельного матеріалу (рисунок 13).

Аналіз кривих, побудованих для різних гідродинамічних режимів роботи сушарки, дозволяє виділити періоди постійної та спадаючої швидкостей сушіння, що 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.

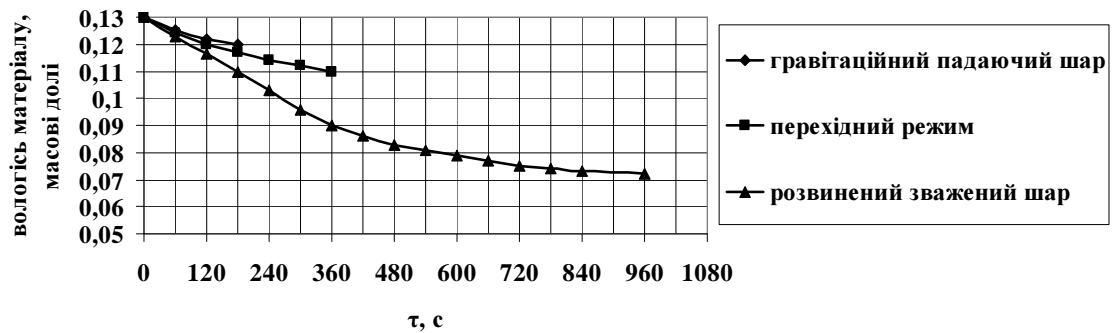


Рисунок 13 – Крива сушіння поліпропілену:  $t_{суш} = 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $L_{пол} = 0,12\text{ м}$ ;

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

Запропоновано такі вдосконалення конструкції ступенів сушарки:

- установа полиць з різним розвантажувальним зазором по висоті сушарки (рисунок 14 а);
- використання полиць з різною перфорацією (рисунок 14 б);
- виконання збірної полиці, кожна з частин якої має різний кут нахилу до горизонту (рисунок 14 в).

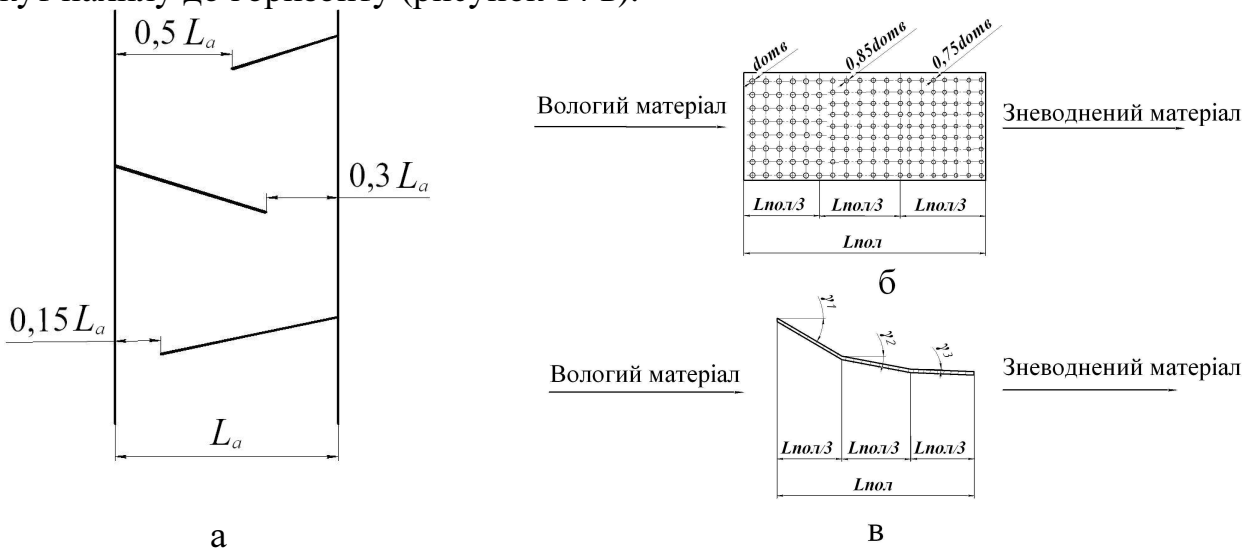


Рисунок 14 – Конструкції полиць багатоступеневої гравітаційної полицної сушарки: а – полиця з різним зазором по висоті сушарки; б – секціонувана полиця зі змінною перфорацією секцій; в – секціонувана полиця з постійною перфорацією секцій та змінним кутом їх нахилу;  $\gamma_i$  – кут нахилу секції полиці до горизонту

Порівняльні епюри розподілення швидкості руху сушильного агента по довжині апарата за різного конструктивного виконання полиць подані на рисунку 15.

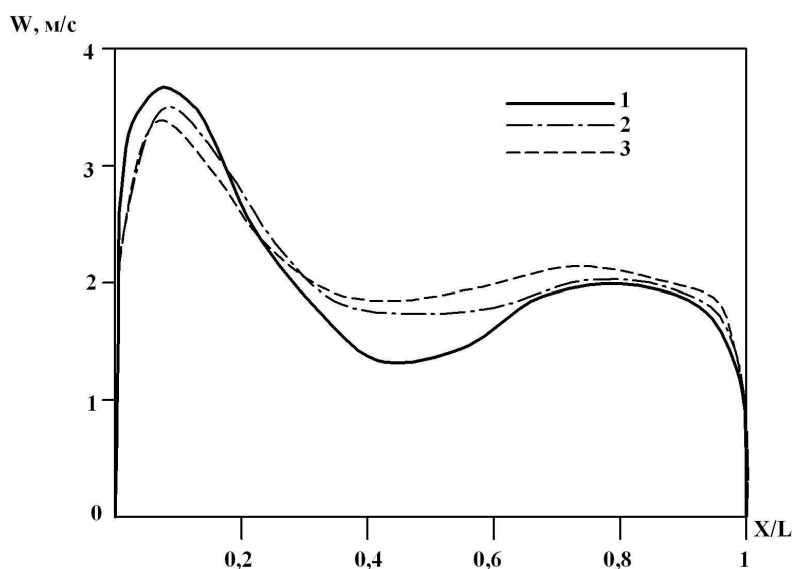


Рисунок 15 – Епюра розподілення швидкості руху газового потоку по довжині апарата при  $X/L = 0,15$ ;  $\psi = 15\%$ ;  $H = 0,25$  м:  
1 – полиця з постійною перфорацією по довжині; 2 – секціонувана полиця зі змінною перфорацією секцій; 3 – секціонувана полиця з постійною перфорацією секцій та змінним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

Подано методику оцінювання енергоефективності процесу за питомою вартістю видалення вологи та витратами теплоносія. Так, питома вартість процесу сушіння складається з вартості енергоресурсу (сушильного агента) та експлуатаційних витрат, записаних у вигляді двочленної цільової функції:

$$F = (aV_{суш} + C_e) / M, \quad (13)$$

$$V_{суш} = \frac{C_e n}{a(1-n)}. \quad (14)$$

де  $a$  – вартість енергоресурсу, грн/м<sup>3</sup>;  $V_{суш}$  – витрати сушильного агента, м<sup>3</sup>/с;  $C_e$  – виробнича складова вартості продукту без витрат на сушіння, грн/с;  $M$  – продуктивність процесу за видаленою вологістю, кг/с;  $n$  – параметр, який залежить від конструкції сушарки та властивостей матеріалу, що висушується.

Використовуючи дані розрахунку питомої вартості процесу сушіння піску в сушарках різних конструкцій, одержано результати, наведені в таблиці 1.

Таблиця 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 – 0,28 кг/с.

Впровадження дослідно-промислового зразка гравітаційної поличної сушарки проведено для сушіння зерен пшениці та соняшнику.

Для розширення діапазону сушіння дослідно-промислова установка складалася з 2 окремих поличних сушарок, з'єднаних між собою послідовно. Кількість поли-



чних контактів кожної з них визначалася кінетичним часом сушіння конкретного матеріалу.

Внаслідок проведення диференційованого режиму зневоднення було досягнуто підвищення швидкості та ефективності видалення вологи на 3–5 % при незмінних енерговитратах і збереженні якісних показників готового продукту.

На рисунку 16 показана крива сушіння, побудована за експериментальними даними промислового впровадження полицної сушарки під час сушіння зерен соняшника.

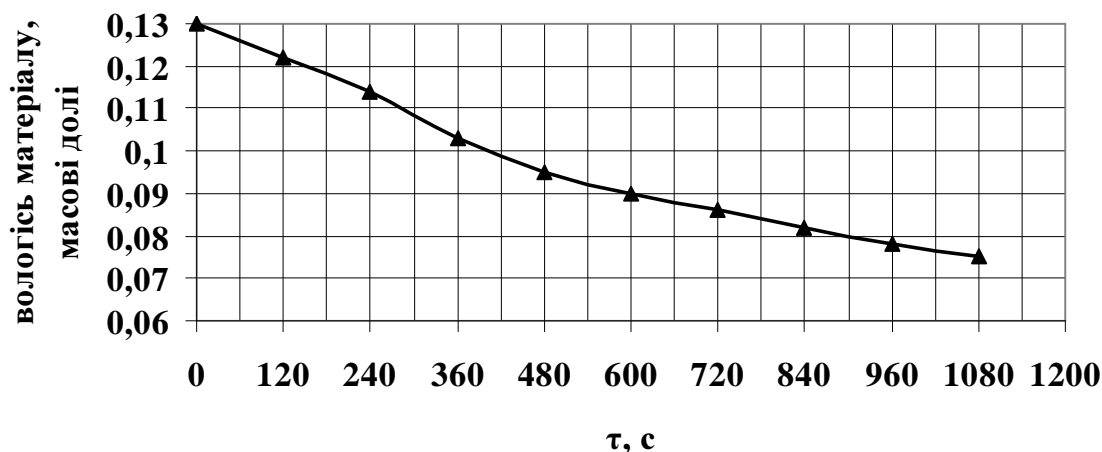


Рисунок 16 – Крива сушіння зерна соняшнику

Дослідно-промисловий зразок полицної сушарки подано на рисунку 17.

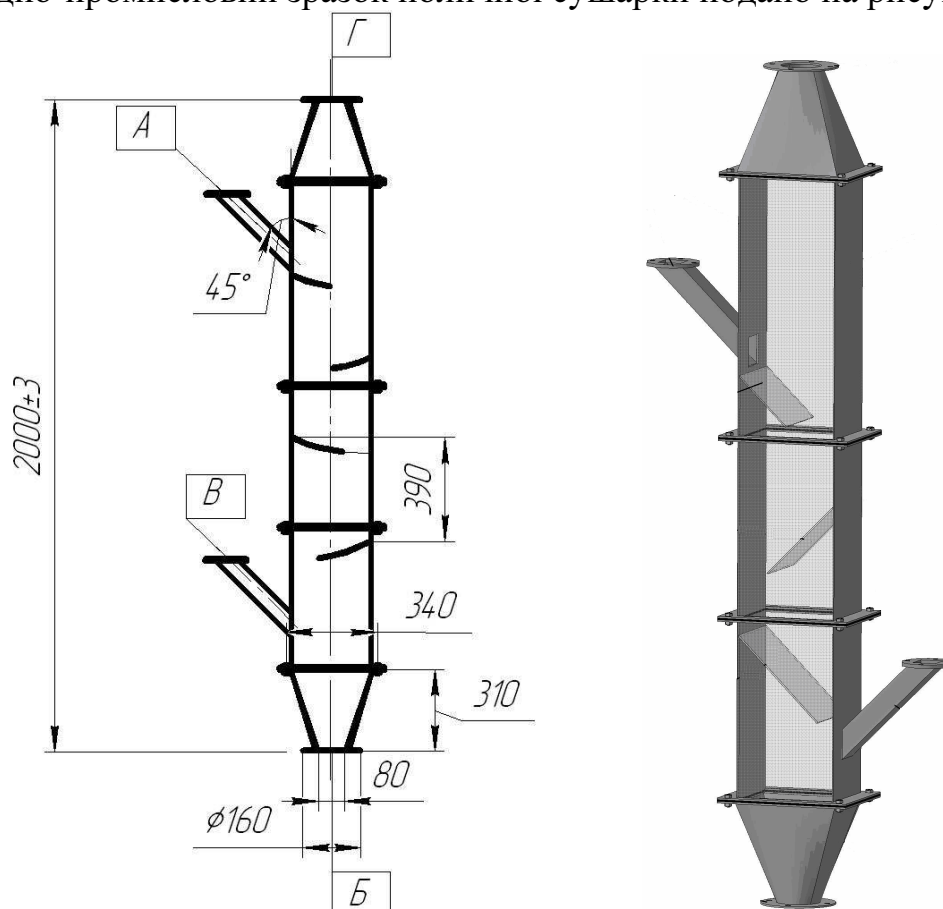


Рисунок 17 – Промисловий зразок полицної сушарки: А – вхід вологого матеріалу; Б – вихід сухого матеріалу; В – вхід сушильного агента; Г – вихід відпрацьованого сушильного агента

## 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 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. 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Шандиба Н. О. Застосування методів оптимізації в енергозберігаючих технологіях / Н. О. Шандиба, М. П. Юхименко, В. О. Герасименко // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». – 2009. – № 1 (20). – С. 125–128. *Особистий внесок: проаналізовано стан проблеми сушіння дисперсних матеріалів у конвективних сушарках, обґрунтовано застосування комбінованих конструкцій апаратів з активним гідродинамічним режимом для інтенсифікації тепломасообмінних процесів.*

2. 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. *Особистий внесок: обґрунтована можливість зменшення енергетичних витрат під час застосування багатоступеневих поличних сушарок.*

3. Артюхова Н. О. Гравітаційні поличні 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. *Особистий внесок: наведено основні переваги багатоступеневих поличних апаратів у застосуванні до процесів сушіння, сформульовано мету і завдання дисертаційних досліджень.*

4. 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. *Особистий внесок: представлено методику проведення експерименту, досліджено гідродинамічні умови руху одно- та двофазного потоків в об'ємі поличної сушарки та визначено основні режими її роботи.*

5. 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. *Особистий внесок: представлено теоретичні основи розрахунку температурно-вологісних характеристик потоків дисперсного матеріалу та сушильного агента на каскаді полиць сушарки.*

6. 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. *Особистий внесок: розроблено математичний апарат для розрахунку поступеневого процесу сушіння дисперсного матеріалу в поличній сушарці.*

7. 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. *Особистий внесок: експериментально визначено оптимальну конструкцію поличних контактів і раціональну організацію руху сушильного агента.*

8. 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. *Особистий внесок: подано теоретичні та експериментальні дані з розрахунку часу перебування дисперс-*

ного матеріалу на полиці сушарки.

9. 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. *Особистий внесок: представлені результати експериментальних досліджень з оцінювання ефективності сушіння на ступенях каскаду полиць сушарки залежно від конструкції полиці та організації руху сушильного агента.*

10. 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. *Особистий внесок: представлено порівняльні результати дослідження гідродинаміки нових конструкцій поличних сушарок.*

11. 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. *Особистий внесок: проведено обґрунтування методики оцінювання та оптимізації енергетичних характеристик процесу в поличних сушарках залежно від аеродинамічного режиму роботи апарата.*

12. 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. *Особистий внесок: представлено дослідно-промислову схему сушіння зернистих харчових матеріалів та розроблено сушарку в складі цієї схеми.*

13. Артюхова Н. О. Вплив організації руху сушильного агента на якість сушіння матеріалів у гравітаційних поличних апаратах / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // Наукові праці ОНАХТ. – 2012. – Вип. 41, Т. 2. – С. 233–237. *Особистий внесок: представлено результати промислового експерименту з сушіння соняшника в поличній сушарці.*

14. 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. *Особистий внесок: розроблено математичну модель гідродинаміки руху сушильного агента в поличній сушарці.*

15. 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. *Особистий внесок: ідея винаходу, підготовка матеріалів для подачі заявки.*

16. Пат. 81720 Україна МПК F 26 В3/02, F 26 В17/12. 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. *Особистий внесок: ідея винаходу, підготовка матеріалів для подачі заявки.*

17. Пат. 92423 Україна, МПК F 26 В 3/02, F 26 В 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. *Особистий внесок: ідея винаходу, підготовка матеріалів для подачі заявки.*

18. 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. *Особистий внесок: ідея програмного продукту, підготовка матеріалів для подачі заявки.*

19. Шандыба Н. А. Эффективная технология противоточной сушки термолabileльных 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.

20. Шандыба Н. Методика рекуррентного розрахунку поличної гравітаційної сушарки сипких матеріалів / Н. Шандыба, М. Юхименко // Тринадцята наукова конференція «Львівські хімічні читання – 2011». – Львів, 2011. – С. У39.

21. Шандыба Н. О. Поличний сушильний апарат для термолabileльних зернових матеріалів / 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.

22. Шандыба Н. О. Структурний аналіз втрат в технологічних процесах переробки сільськогосподарської продукції / Н. О. Шандыба, М. П. Юхименко // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини : збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Харків, 2011. – С. 101–102.

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. Шандыба О. Б. Оптимізація технологічних характеристик багатоступеневої гравітаційної сушарки / О. Б. Шандыба, Н. О. Артюхова // VIII Міжнародна науково-практична конференція «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення».– Алушта 2012. – Т. 2. – С. 282–285.

27. Артюхова Н. А. Повышение эффективности обработки зернистых материалов во взвешенном слое / Н. А. Артюхова, А. Е. Артюхов // Инновационные тех-

нологии в производстве, науке и образовании : сборник трудов II Международной научно-практической конференции.– Махачкала, 2012. – Ч. 2. – С. 49–55.

28. 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. – Сєверодонецьк, 2012. – С. 159–160.

29. 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 факту технічних систем та енергоефективних технологій. – Суми, 2013. – Ч. 2. – С. 141.

30. 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. – Khmelnit-sky, 2013. – Vol. 2. – P. 124–128.

31. Артюхова Н. А. Опытнo-промышленное внедрение гравитационных по-лочных сушилок зернистых материалов / Н. А. Артюхова, Н. П. Юхименко // Мате-риалы Международной научно-практической конференции молодых ученых.– Гор-ки, 2013. – Ч. 1. – С. 232–234.

32. 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.

33. Артюхова Н. О. Вдосконалення конструкції поличних контактів багато-ступеневих гравітаційних сушарок / Н.О. Артюхова, М.П. Юхименко // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали III Всеукраїнської міжвузівсь-кої науково-технічної конференції. – Суми, 2014. – Ч. 2. – С. 91.

## АНОТАЦІЯ

**Артюхова Н. О. Сушіння дисперсних матеріалів у багатоступеневих по-личних апаратах з активним гідродинамічним режимом. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеці-альністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Сумський держав-ний університет МОН України, Суми, 2015.

Дисертація присвячена питанням теоретичних та експериментальних дослі-джень процесу сушіння у робочому просторі багатоступеневих гравітаційних полич-них сушарок із вертикальним секціонуванням робочого простору. Запропоновано аналітичні рівняння, що описують: закономірності сушіння одиночної частинки та їх сукупності; гідродинаміку руху газового потоку, одиночної частинки та дисперсного матеріалу в режимі стисненого потоку; ефективність ступеневого сушіння дисперс-ного матеріалу на кожній полиці каскаду і в апараті в цілому. Експериментально ви-значено режими роботи сушарки, досліджено вплив конструкції полиці та організа-ції руху сушильного агента на гідродинамічні показники руху потоків у робочому просторі гравітаційної поличної сушарки та інтенсивність зневоднення дисперсного

матеріалу, одержано критеріальну залежність, що дозволяє прогнозувати значення коефіцієнта масовіддачі під час сушіння в гравітаційних поличних сушарках.

На базі створених фізичної та математичної моделей і проведених експериментальних досліджень розроблено методику інженерного розрахунку багатоступеневих сушарок поличного типу з визначенням основних геометричних характеристик апарата і температурно-вологісних параметрів потоків дисперсного матеріалу та сушильного агента. Запропонована методика оцінювання енергоефективності процесу сушіння дисперсних матеріалів за критерієм питомих енерговитрат на інтенсифікацію.

Запропоновані та захищені патентами України нові вискоефективні пристрої для здійснення процесу сушіння. Проведено дослідно-промислове впровадження поличних сушарок із порівняльним аналізом товарної продукції, результати якого показали високу ефективність розробленого обладнання.

**Ключові слова:** сушіння, гідродинаміка, кінетика, моделювання, полична сушарка, ефективність.

## АННОТАЦІЯ

**Артюхова Н. А. Сушка дисперсних матеріалів в многоступенчатых полочных аппаратах с активным гидродинамическим режимом. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Сумский государственный университет МОН Украины, Сумы, 2015.

Диссертация посвящена вопросам теоретических и экспериментальных исследований процесса сушки в рабочем пространстве многоступенчатых гравитационных полочных сушилок с вертикальным секционированием рабочего пространства.

Предложена физическая модель движения взаимодействующих потоков, что позволяет определить периоды сушки дисперсного материала касательно особенностей проведения данного процесса в гравитационной полочной сушилке.

Создана математическая модель, описывающая: 1) закономерности сушки одиночной частицы и частиц во взвешенном слое в режиме стеснённого движения с определением времени прогрева и обезвоживания дисперсного материала; 2) гидродинамику движения газового потока, одиночной частицы и частицы в режиме стеснённого движения с определением времени пребывания дисперсной фазы в рабочем пространстве сушилки; 3) температурно-влажностные характеристики взаимодействующих потоков и эффективность каждой ступени сушилки с учетом гидродинамики рабочего пространства аппарата, конструкции полок, свойств сушильного агента и способа организации его движения.

Экспериментально установлено влияние конструкции полки и организации движения сушильного агента на гидродинамические характеристики работы гравитационной полочной сушилки и время пребывания дисперсного материала в объеме аппарата. Определены основные гидродинамические режимы работы гравитационной полочной сушилки в зависимости от нагрузки по потокам, а также время пребывания дисперсной фазы в каждом из режимов. Получена критериальная зависимость, позволяющая прогнозировать значение коэффициента массоотдачи при сушке в гравитаци-

онных полочных сушилках. Получены данные о температурно-влажностных характеристиках взаимодействующих потоков и эффективности ступеней сушилки в зависимости от конструкции полки и организации движения сушильного агента. Показано, что за счет изменения конструкции полки и организации движения сушильного агента возможно управление временем пребывания обезвоживаемого материала и значением эффективности каждой ступени сушилки.

На основе созданных физической и математической моделей и проведенных экспериментальных исследований разработана методика инженерного расчета многоступенчатых сушилок полочного типа с определением основных геометрических характеристик аппарата и температурно-влажностных параметров потоков дисперсного материала и сушильного агента.

Предложена методика оценки энергоэффективности процесса сушки дисперсных материалов по критерию удельных энергозатрат на интенсификацию.

Предложены и защищены патентами Украины новые высокоэффективные устройства для осуществления процесса сушки. Проведено опытно-промышленное внедрение полочных сушилок со сравнительным анализом товарной продукции, результаты которого показали высокую эффективность разработанного оборудования.

**Ключевые слова:** сушка, гидродинамика, кинетика, моделирование, полочная сушилка, эффективность.

## ANNOTATION

**Artyukhova N. O. Disperse materials drying in multistage shelf devices with active hydrodynamic regime. – Manuscript.**

Ph.D. thesis in Technical Science on speciality 05.17.08 – processes and the equipment of chemical technology. – Sumy State University MSE of Ukraine, Sumy, 2015.

Thesis is devoted to theoretical and experimental researches of the drying process in the workspace of multistage shelf gravitational dryers with vertical sectioning of the workspace. In thesis it is proposed the analytical equations describing: regularities of a single particles drying and their aggregates; hydrodynamics movement of the gas flow, single particles and disperse material in the compressed flow regime; efficiency of stage drying of disperse material on each cascade shelf and totally in the device. The regimes of dryers were determined experimentally, it was studied the influence of shelf design and the organization of the drying agent movement on hydrodynamic indicators of flows movement in the working space of gravitational shelf dryer and intensity of disperse material dehydration, it is received the criteria dependence that allows to predict the value of the mass-transfer coefficient while drying in the gravitational shelf dryers.

The methodology of engineering calculation of multistage shelf-type dryers with the determination of the basic geometric characteristics of the device and temperature-moisture parameters of dispersed material and drying agent flows was developed based on the established physical and mathematical models and conducted experimental researches. It is proposed the methodology of energy efficiency evaluation of the drying of dispersed materials due the criterion of the specific energy consumption for intensification.



New high-effective devices for the drying process are proposed and patented in Ukraine. Experimental and industrial adoption of shelf dryers was made alongside with the comparative analysis of commodity output, the results of which demonstrated the high efficiency of the devices.

**Keywords:** drying, hydrodynamics, kinetics, modeling, shelf dryer, efficiency.

Підписано до друку 09.10.2015 р.  
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № 1005.

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007 р.