

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ

**САБАДАШ СЕРГІЙ МИХАЙЛОВИЧ**



УДК 664.8.047:636.087.2

**ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ  
ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ**

Спеціальність 05.18.12 – процеси та обладнання харчових,  
мікробіологічних та фармацевтичних виробництв

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському національному аграрному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

**Якуба Олександр Радіонович,**

Сумський національний аграрний університет,  
завідувач кафедри інженерних технологій харчових  
виробництв

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

**Погожих Микола Іванович,**

Харківський державний університет харчування та торгівлі,  
завідувач кафедри фізико-математичних  
та інженерно-технічних дисциплін

кандидат технічних наук, доцент

**Якобчук Роман Леонідович,**

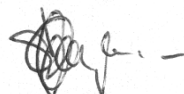
Національний університет харчових технологій,  
доцент кафедри технологічного обладнання  
та комп'ютерних технологій проектування

Захист відбудеться «23» листопада 2016 року о 10<sup>00</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.088.01 Харківського державного університету харчування та торгівлі за адресою: вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського державного університету харчування та торгівлі за адресою: вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051.

Автореферат розісланий «21» жовтня 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В.М. Онищенко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Останнім часом у світі все більше уваги приділяється збільшенню ресурсів харчового білка, удосконаленню техніки і технології переробки традиційних і нетрадиційних сировинних ресурсів у різних галузях харчової промисловості, розширенню асортименту повноцінних продуктів харчування.

Одним із способів вирішення проблеми збільшення ресурсів білка є використання вторинних сировинних ресурсів.

Останнім часом в Україні використання вторинної сировини підприємств харчової промисловості набуває все більшої актуальності. Великі обсяги промислової переробки різноманітної сировини рослинного походження на харчові цілі становлять значний потенціал для агропромислового комплексу. Це стосується й післяспиртової барди, яка являє собою сировину, що містить білки, жири, вуглеводи та незамінні амінокислоти. Отже, унаслідок утилізації післяспиртової барди не тільки забруднюється довкілля, а й нерационально використовуються харчові ресурси такого цінного продукту.

Вирішення проблеми, яка є нагальною, – це консервування нативної післяспиртової барди для подальшого її використання в харчових продуктах. При цьому переваги сушеної післяспиртової барди перед нативною є такими:

- можливість транспортування на великі відстані;
- тривалий термін зберігання сушеної післяспиртової барди;
- використання в технології виробництва хліба;
- використання як білкової добавки.

Отже, актуальним завданням є розробка нових і модернізація існуючих способів сушіння. Одним із таких способів є сушіння у псевдозрідженому шарі інертного носія, який для сушіння післяспиртової барди до цього не використовувався через складність перебігу процесу. Зазначене стало підставою для вибору теми дисертаційної роботи.

Наукове підґрунтя сушіння, яке здійснюється різними способами, викладено в працях О.В. Ликова, М.Ю. Лур'є, А.Н. Плановського, П.Д. Лебедева, А.С. Гінзбурга, Н.Е. Федорова. Крім того, значним є внесок у дослідження цього питання таких відомих вчених сучасності, як М.І. Погожих, В.О. Потапов, М.А. Грішин, Ю.Ф. Снежкін, Г.М. Станкевич та ін.

Для підприємств спиртової промисловості проблеми з утилізації післяспиртової барди є надто важливими, вони потребують раціонального вирішення із застосуванням нових технологій, інших удосконалених методів і способів.

Зважаючи на наведене вище, можна зробити висновок, що актуальним завданням є дослідження сушіння післяспиртової барди в сушарках псевдозрідженого шару інертного носія і вдосконалення на цій основі процесу, способу та обладнання для його здійснення, що й стало метою дисертаційного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, темами.** Дисертаційне дослідження виконувалося на кафедрі інженерних технологій харчових

виробництв згідно із планом науково-дослідних робіт Сумського національного аграрного університету за темою №0112u003127 «Інтенсифікація процесу сушіння післяспиртової барди з удосконаленням системи пиловловлення».

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є обґрунтування енергоефективного процесу сушіння післяспиртової барди шляхом вибору найбільш раціональних способів і технологій сушіння на основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

Зазначена мета зумовила необхідність вирішення таких завдань:

- проаналізувати сучасний стан теорії, способів та обладнання для сушіння післяспиртової барди;
- розробити експериментальний стенд із дослідження процесів гідродинаміки та тепло- й масообміну сушіння післяспиртової барди;
- визначити вплив робочих параметрів процесу на тривалість сушіння і якість готового продукту;
- експериментально дослідити швидкості початку псевдозрідження, стійкого режиму фонтанування й винесення частинок;
- експериментально дослідити особливості псевдозрідженого шару й умови, необхідні для забезпечення його стійкості;
- отримати узагальнене (критеріальне) рівняння теплообміну для опису процесу сушіння післяспиртової барди в сушарках псевдозрідженого шару інертного носія;
- розробити апаратурно-технологічну схему сушіння післяспиртової барди;
- виконати комплекс заходів щодо практичної реалізації результатів досліджень та визначити економічний ефект від провадження даної технології сушіння.

*Об'єкт дослідження* – процес сушіння післяспиртової барди у псевдозрідженому шарі інертного носія.

*Предмет дослідження* – післяспиртова барда, способи попередньої підготовки сировини.

*Методи дослідження* базуються на аналітичних, теоретичних та експериментальних дослідженнях процесу сушіння, з використанням сучасних вимірювальних приладів і методів комп'ютерної обробки результатів.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у розв'язанні науково-прикладного завдання підвищення енергоефективності процесу сушіння післяспиртової барди у псевдозрідженому шарі інертного носія за рахунок вибору найбільш раціональних способів і технологій сушіння:

- уперше отримано нові дані про вплив робочих параметрів процесу сушіння (температури, швидкості повітря, розміру і форми частинок продукту) на інтенсивність сушіння післяспиртової барди в сушарках із псевдозрідженим шаром інертного носія;
- експериментально визначено, що дисперсний склад післяспиртової барди змінюється після сушіння та впливає на режими утворення псевдозрідження і на інтенсивність масообміну;

– встановлені величини швидкостей потоку сушильного агенту, що обумовлюють початок псевдозрідження, стійкий режим фонтанування і винесення частинок із камери сушіння;

– отримано емпіричне рівняння для розрахунку діаметра центрального ядра псевдозрідженого шару, яке придатне для розрахунку конструктивних і технологічних параметрів циліндро-конічних апаратів за умови забезпечення стійкості технологічного процесу;

– отримано критеріальне рівняння для визначення числа  $Nu$  в умовах сушіння післяспиртової барди у розробленій сушарці, яке відрізняється наявністю геометричного симплекса ( $H_0/d$ ).

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

Розроблено раціональні режими процесу сушіння післяспиртової барди у псевдозрідженому шарі інертного носія.

Розроблено принципову технологічну схему переробки та установку для сушіння післяспиртової барди у псевдозрідженому шарі інертного носія.

Розроблено конструкцію сушарки у псевдозрідженому шарі інертного носія, на яку отримано патент України на корисну модель №4859.

Розроблено спосіб сушіння післяспиртової барди, на яку отримано патент України на корисну модель №90285.

*Реалізація роботи.* За результатами проведених досліджень пройшла експериментальну апробацію та впровадження у виробництво сушарка у псевдозрідженому шарі інертного носія для сушіння післяспиртової барди на ДП «Дубов'язівський спиртовий завод» (акт від 05.12.2010 р.).

Матеріали дисертаційних досліджень використовуються у навчальному процесі Сумського національного аграрного університету під час викладення теоретичного та практичного курсу «Процеси та апарати харчових виробництв» (акт від 25.09.2015 р.).

**Особистий внесок здобувача** полягає в аналізі стану проблеми, формулюванні мети дослідження, постановці завдань дослідження, проведенні патентного пошуку, теоретичних розрахунків, експериментальних досліджень, обробці й аналізі дослідних даних із вивчення процесу сушіння післяспиртової барди в сушарках із псевдозрідженим шаром інертного носія, узагальненні отриманих результатів, підготовці матеріалів до публікації, складанні заявок на корисні моделі, розробці інструкції з експлуатації і проведенні заходів з упровадження науково-технічних розробок у виробництво.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення роботи доповідались, були обговорені та схвалені на наукових конференціях Сумського національного аграрного університету (м. Суми, 2008-2011 рр.), 74-й науковій конференції молодих вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства XXI століття» (м. Київ, 2008 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (м. Харків, 2008 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Стратегічні напрямки розвитку підприємств харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі» (м. Харків, 2008 р.), 11-й Міжнародній науково-

практичній конференції «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв» (м. Харків, 2009 р.), 7-й Міжнародній конференції «Проблеми харчових технологій і харчування. Сучасні виклики і перспективи розвитку» (м. Святогірськ, 2011 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (м. Харків, 2011, 2013 та 2015 рр.).

Результати досліджень були представлені на регіональних виставках: «Життя у стилі Еко-Сумщина-2015» (м. Суми, 2015 р.), «Продукти для здорового життя» (м. Суми, 2016 р.).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 14 наукових праць, у тому числі: 5 статей, серед яких 4 – у наукових фахових виданнях України (з них 1 – у виданні, яке включено до міжнародних наукометричних баз), 1 – у науковому періодичному виданні іншої держави з напрямку, з якого підготовлено дисертацію; 2 патенти України на корисну модель; 6 матеріалів конференцій та тез доповідей.

**Структура і об'єм роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, 4 додатків, а також списку використаних джерел, який містить 133 найменувань. Основний зміст роботи викладено на 145 сторінках друкованого тексту, що містить 42 рисунки та 25 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, наведено наукову новизну та практичне значення роботи, викладено відомості щодо апробації роботи, публікації автора, надано загальну характеристику роботи.

У **першому розділі** «Аналіз сучасного стану переробки післяспиртової барди на сушену продукцію» наведено загальну характеристику післяспиртової барди як об'єкта сушіння, показано її хімічний склад, а також доцільність її переробки.

Аналіз нативної та сушеної післяспиртової барди за різними показниками та огляд вітчизняних і зарубіжних публікацій з відповідної проблематики дозволив сформулювати основні вимоги до процесу сушіння, які диктуються тенденціями розвитку сучасних ринкових відношень і проблемою збільшення ресурсів білка внаслідок використання вторинних сировинних ресурсів:

- вибір оптимальних параметрів процесу, які забезпечать високі органолептичні, структурно-механічні та технологічні властивості;
- використання енергоощадних технологій, які забезпечать конкурентоспроможність сушеної продукції;
- створення гнучких технологій і зручного в експлуатації обладнання, що дозволять швидко реагувати на попит певного виду продукції.

На основі результатів огляду науково-технічної та патентної літератури зроблено висновок про необхідність створення нових та вдосконалення існуючих технологій і техніки для проведення сушіння післяспиртової барди в сушарках псевдозрідженого шару інертного носія.

У кінці розділу етапи досліджень сформульовано у вигляді структурно-логічної схеми.

У **другому розділі** «Організація, методика та методи досліджень, узагальнення й аналіз» як основний керівний документ для організації і проведення експериментальних досліджень сушарок у псевдозрідженому шарі інертного носія прийняті положення «Єдиної методики» порівняння сушарок цього типу.

Розглянуто характеристики типової моделі сушарки у псевдозрідженому шарі інертного носія для сушіння дисперсних матеріалів (рис. 1), визначено її недоліки та методи вдосконалення шляхом проведення експериментальних досліджень на спеціально розробленому стенді.

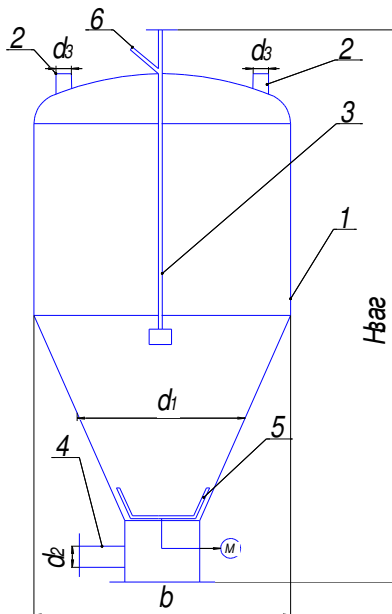


Рис. 1. Типова конструкція сушарки у псевдозрідженому шарі інертного носія ГТЗ-01: 1 – сушильна камера; 2 – патрубки для виходу продукту; 3 – патрубок для подачі стисненого повітря; 4 – патрубок для входу теплоносія; 5 – мішалка; 6 – патрубок для потрапляння продукту в камеру;  $H_{\text{заг}}$  – загальна висота апарата;  $d_1$  – діаметр конусної частини апарата;  $d_2$  – діаметр патрубка для входу теплоносія;  $d_3$  – діаметр для виходу відпрацьованого повітря із продуктом;  $b$  – ширина сушарки у псевдозрідженому шарі інертного носія

Проаналізовано конструктивні особливості цієї сушарки у псевдозрідженому шарі інертного носія, які виявили недоліки конструкції установки. Запропоновано конструктивне рішення для усунення виявлених недоліків: у верхній частині камери створено пристрій для уловлення продукту у вигляді завихрювача, який дозволив прискорити інтенсивність забору продукту і тим самим скоротити час перебування сушеної післяспиртової барди в камері.

Для визначення діаметра ядра псевдозрідженого шару інертного носія, швидкостей початку псевдозрідження, стійкого фонтанування і винесення частинки продукту з камери, дослідження процесу тепло- й масообміну сушіння було розроблено експериментальну установку (рис. 2).

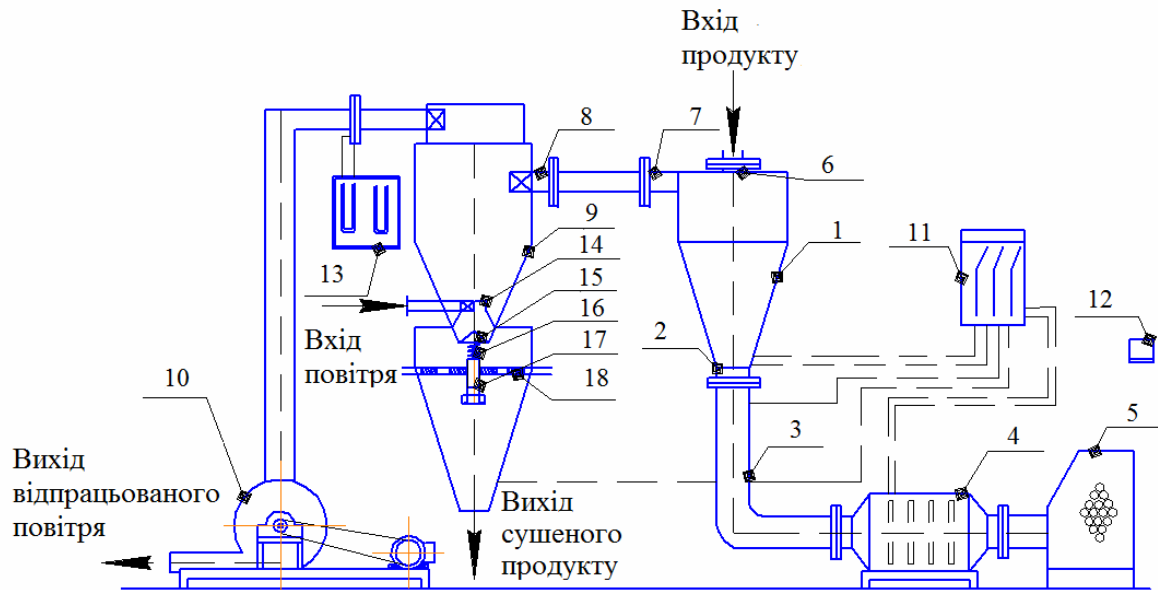


Рис. 2. Схема загального вигляду експериментальної установки: 1 – сушильна камера; 2 – розподільна решітка; 3 – патрубок для подачі теплоносія; 4 – калорифер; 5 – вентилятор; 6 – патрубок для подачі продукту; 7 – патрубок для виносу продукту; 8 – вхідний патрубок; 9 – циклонний пиловловлювач; 10 – всмоктувальний вентилятор; 11 – потенціометр; 12 – ЛАТР; 13 – U-подібний мікроманометр; 14 – циліндро-конічне сопло; 15 – затвір; 16 – пружина; 17 – пристрій для регулювання затвору; 18 – перфорована пластина

Застосована методика визначення швидкостей псевдозрідження містить формули, засновані на критичному аналізі відомих методів визначення швидкостей початку режиму псевдозрідження, стійкого режиму псевдозрідження, режиму винесення частинок, що ґрунтуються на концепції О.М. Годеса.

Визначення діаметра центрального фонтануючого ядра проводилося з огляду на концепцію В.Д. Михайлика. Дисперсність і гранулометричний склад модельних зразків продукту (післяспиртова барда віджата, післяспиртова барда сушена, післяспиртова барда відновлена) визначено за допомогою USB цифрового мікроскопа. Густина нативного продукту та насипну густина – відповідно за допомогою пікнометра та методу з використанням воронки.

**У третьому розділі** «Експериментальні дослідження процесу сушіння післяспиртової барди у псевдозрідженому шарі інертного носія» встановлено оптимальні температурні режими сушіння післяспиртової барди. Досліджено фізико-механічні властивості, дисперсний склад модельних зразків, особливості псевдозрідженого шару й умови, необхідні для забезпечення його стійкості.

У табл. 1 наведено оптимальні показники сушіння у псевдозрідженому шарі інертного носія післяспиртової барди.



**Показники сушіння післяспиртової барди  
у псевдозрідженому шарі інертного носія**

Найменування продукту	Інертний носій – фторопласт, d, м	Температура повітря, °С		Вологість, %		Питома витрата повітря, кг/кг вологи	Питома витрата тепла, ккал/кг вологи	Питома продуктивність, кг/м <sup>3</sup> год	
		t <sub>вх</sub>	t <sub>вих</sub>	ω <sub>поч</sub>	ω <sub>к</sub>			по волозі	по сухому продукту
Післяспиртова барда	0,04	130	55	45	10	60	1000	150	120

Для проведення ряду механічних процесів, таких як подрібнення, сепарація, розпилювання, брикетування, гранулювання, транспортування, зберігання, було визначено густину нативної післяспиртової барди. За кінцевий результат дослідження брали середнє арифметичне результатів трьох паралельних досліджень (рис. 3).

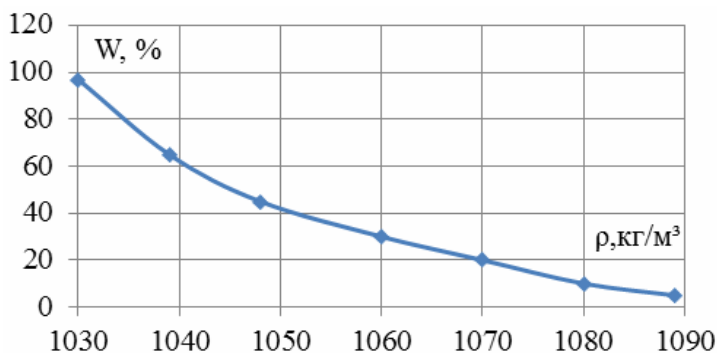


Рис. 3. Вологовміст післяспиртової барди за різної густини

проектування технологічного обладнання встановлено залежність насипної густини від вологості післяспиртової барди (рис. 4).

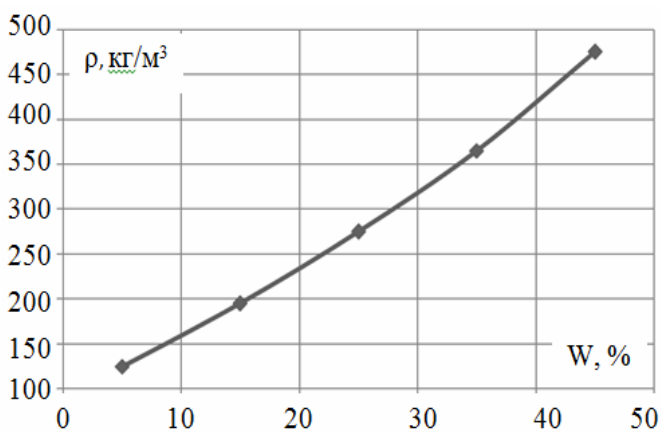


Рис. 4. Насипна густина післяспиртової барди за різного вологовмісту

Згідно з цією залежністю зі збільшенням вологовмісту післяспиртової барди густина зменшується і має криволінійний характер, це зумовлено не тільки кількісною зміною вологи, а головним чином її якісним станом.

З метою раціонального використання обладнання для транспортування сировини, рівномірного розподілу площі під час зберігання сировини та

зі збільшенням вологовмісту W продукту від 0 до 50% насипна густина збільшується, це пояснюється збільшенням коефіцієнта внутрішнього тертя та зменшенням простору між частинками. Насипна густина матеріалу збільшується від 125 до 457 кг/м<sup>3</sup>.

Дисперсний склад модельних зразків продукту (післяспиртова барда віджата, післяспиртова барда сушена,

післяспиртова барда відновлена) визначали за описаною вище методикою. Результати досліджень наведено в табл. 2.

Таблиця 2

### Дисперсний склад дослідного продукту

Найменування зразку	Середній діаметр частинок, $d_{\text{сер}}$ , мм
Післяспиртова барда віджата	2,0
Післяспиртова барда сушена	3,7
Післяспиртова барда відновлена	2,4

Отримані дані були оброблені в середовищі MathCad та подані у вигляді інтегральних і диференціальних функцій розподілу частинок для кожного проаналізованого зразка (рис. 5).

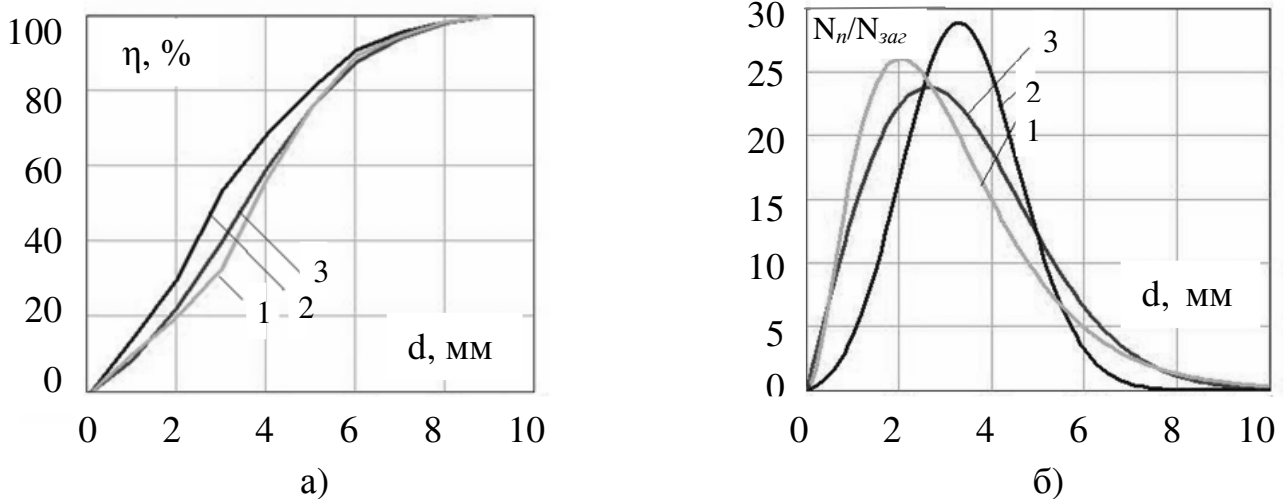
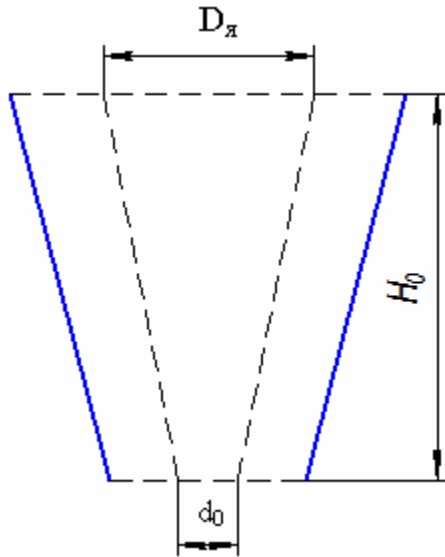


Рис. 5. Інтегральні (а) та диференціальні (б) функції розподілу розмірів частинок для трьох модельних продуктів різної дисперсності: 1 – крива для післяспиртової барди віджатої; 2 – крива для післяспиртової барди сушеної; 3 – крива для післяспиртової барди відновленої

Інтегральна та диференціальна функції розподілу розмірів частинок дослідного продукту для трьох модельних продуктів різної дисперсності досить точно описані експериментальними даними. Видно, що після сушіння крива 2 розподілу має виражений максимум і меншу ширину, оскільки частинки за розмірами більш однорідні, у той час як волога і відновлена барда (криві 1, 3) характеризується зміщенням максимуму вліво, і стає ширше. Очевидно, це пов'язано з тим, що крупніші частинки зволоження внаслідок часткового набухання збільшуються в розмірах за умови, що й відображає певна асиметрія самих кривих. Відповідно, під час сушіння необхідно враховувати цей факт, який буде позначатися й на режимі утворення псевдозрідження, і на масообміні, оскільки частинки за високої дисперсності легше віддають вологу.

Визначення діаметра ядра псевдозріженого шару проводилося на експериментальній установці (рис. 2). За основу теоретичних досліджень з

визначення діаметра ядра псевдозрідженого шару брали рівняння білоруського винахідника В.Д. Михайлика. Удосконаливши це рівняння, нами одержано емпіричне рівняння (1) для розрахунку діаметра ядра псевдозрідженого шару інертного носія для сушіння післяспиртової барди. За основу розрахунку взято постулат, що сила гідродинамічного тиску газового потоку на центральну частину зернистого шару дорівнює вазі центральної частини. У спрощеному вигляді взято об'єм звичайного конуса (рис. 6) замість усіченого.



$$D_{\text{я}} = \frac{3 \cdot \lambda \cdot d_0^2 \cdot \omega_0^2 \cdot \rho_{\text{Г}}}{8 \cdot g \cdot \rho_{\text{Т}} \cdot (1 - \varepsilon) d_e'} \quad (1)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт лінійних втрат;  $d_0$  – діаметр вхідного отвору, мм;  $\omega_0$  – швидкість газу у вхідному отворі, м/с;  $\rho_{\text{Г}}$  – густина газу, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{Т}}$  – густина твердих частинок, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  – порізність шару в центральній частині;  $d_e'$  – еквівалентний діаметр частинок шару, м.

На рис. 7 подано порівняльні дані розрахунків діаметра ядра за емпіричною залежністю та дослідями В.Д. Михайлика за різної порізності шару ( $\varepsilon$ ).

Рис. 6. Робоча камера апарату

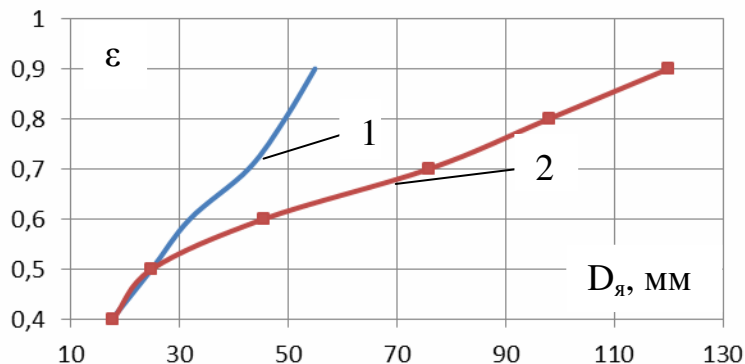


Рис. 7. Порізність псевдозрідженого шару за розрахунками: 1 – розрахунок за В.Д. Михайликом; 2 – розрахунок за емпіричною залежністю

Рівняння (1) показує майже повну відповідність залежностей 1 і 2 між собою для порізності шару  $\varepsilon=0,4 \div 0,5$ . Для більших порізностей ( $\varepsilon=0,6 \div 0,9$ ) мають місце відхилення розрахунків, це дає змогу отримати більш точні дані під час розрахунку ядра псевдозрідженого шару.

Експериментальні дослідження з визначення режимів псевдозрідження під час сушіння проводилися в камері з конічним днищем (рис. 8), яка має такі геометричні параметрами: діаметр вхідного отвору  $d_0=50$  мм, діаметр циліндричної частини апарату  $D_{\text{ц}}=120$  мм, висота камери  $H=125$  мм. Під час

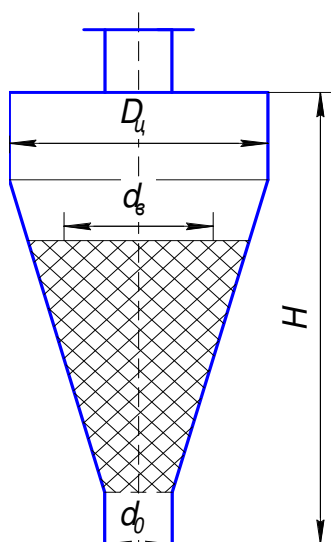


Рис. 8. Камера для дослідження швидкостей псевдозрідження

досліджень виміряли витрату повітря витратомірною шайбою. Висота шару фторопластової крихти з еквівалентним діаметром  $d_e=4$  мм становила 30 мм, діаметр верхнього перерізу  $d_b=74$  мм. Основою для розрахунку стали критична швидкість на початку псевдозрідження і швидкість винесення частинок, яка називається швидкістю витання. Для дослідження псевдозрідження частинок у циліндро-конічному апараті були використані методи О.М. Тодеса. Перетворивши рівняння, отримали залежності розрахунку швидкостей початку псевдозрідження при порізності ( $\epsilon=0,4$ ) до винесення частинок ( $\epsilon=1$ ). У ході експериментальних досліджень отримано рівняння швидкостей для різних режимів псевдозрідження, наведених у табл. 3.

Таблиця 3

**Рівняння для визначення швидкостей псевдозрідження**

$\epsilon$	Розрахункові формули	Застосування
0,4	$Re_n = \frac{Ar \cdot 0,01286}{18 \frac{d_0}{d_e} + 0,038 \sqrt{Ar \frac{d_0}{d_e} \left( \frac{d_0^2}{d_e^2} + \frac{d_0}{d_e} + 1 \right)}}$	Рівняння для початку режиму псевдозрідження
0,5÷0,9	$Re_c = \frac{Ar \cdot \epsilon^{4,75}}{18 \frac{d_0}{d_e} + 0,35 \sqrt{Ar \cdot \epsilon^{4,75} \frac{d_0}{d_e} \left( \frac{d_0^2}{d_e^2} + \frac{d_0}{d_e} + 1 \right)}}$	Рівняння для стійкого режиму псевдозрідження
1	$Re_e = \frac{Ar}{18 \frac{d_0}{d_e} + 0,35 \sqrt{Ar \frac{d_0}{d_e} \left( \frac{d_0^2}{d_e^2} + \frac{d_0}{d_e} + 1 \right)}}$	Рівняння для режиму винесення частинок

Результати розрахунків за наведеними емпіричними залежностями і дані експериментів подано на рис. 9. Показано, що при порізності шару від 0,4–0,5 швидкість теплоносія є незначною, це свідчить про нерухомість шару; при порізності шару від 0,5 до 0,9 швидкість прямолінійно зростає і розпочинається процес стійкого псевдозрідження; при порізності, що дорівнює 1, настає режим винесення частинок, і швидкість теплоносія набуває свого максимуму.

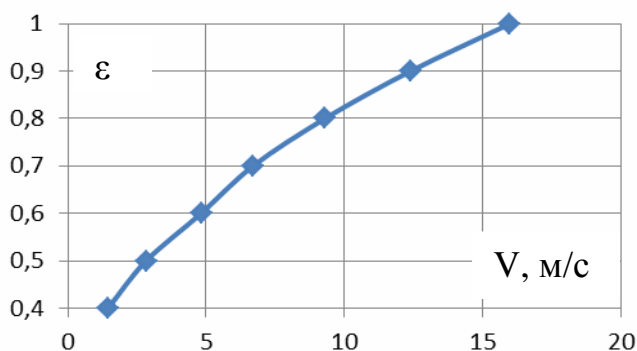


Рис. 9. Порізність псевдозрідженого шару за розрахунками табл. 3

Установлення залежності між продуктивністю сушарки і температурою матеріалу під час його зневоднення є однією з актуальних задач при дослідженні сушіння післяспиртової барди у псевдозрідженому шарі інертного носія. На рис. 10 відзначено, що питома продуктивність за випареною вологою сушарки прямо пропорційна температурі сушильного агента, тобто зі збільшенням температури повітря на вході в камеру сушарки збільшується і продуктивність сушарки, що досягає свого максимального значення при продуктивності  $\Delta W = 150$  кг вологи/м<sup>3</sup> год. Таким чином, установлено, що оптимальною температурою для сушіння післяспиртової барди у псевдозрідженому шарі інертного носія є 130<sup>0</sup>С. За цієї температури досягається максимальна продуктивність сушарки за випареною вологою.

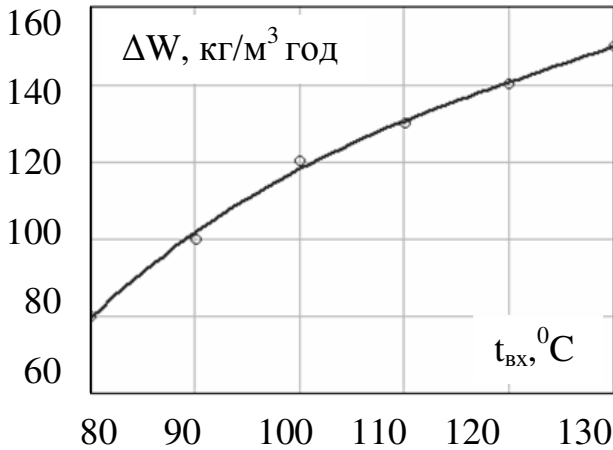


Рис. 10. Залежність продуктивності сушарки ( $\Delta W$ ) від температури повітря на вході в камеру ( $t_{вх}$ ) при  $\omega_{п} = 45\%$ ,  $\omega_{к} = 10\%$

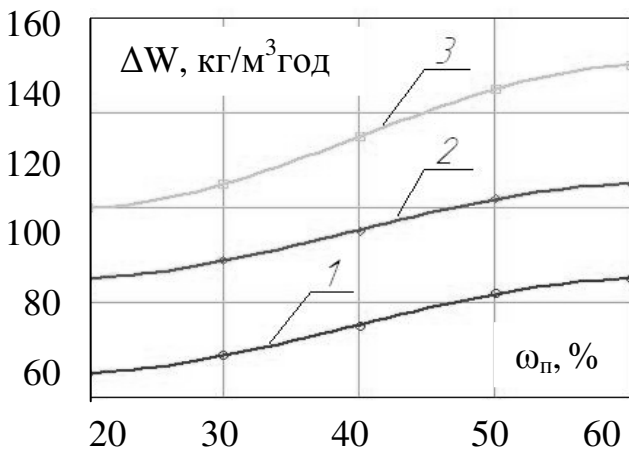


Рис. 11. Залежність продуктивності сушарки ( $\Delta W$ ) від початкової вологості продукту при  $\omega_{к} = 10\%$ ; 1 – 90<sup>0</sup>С; 2 – 110<sup>0</sup>С; 3 – 130<sup>0</sup>С

Якщо збільшити температуру сушильного агента, то це призведе до погіршення якості продукту та підвищення енерговитрат. Отримана крива свідчить про те, що температура є найбільш значущим чинником, який впливає на продуктивність сушарки.

Одне із завдань цієї роботи – отримання узагальненого (критеріального) рівняння для сушіння післяспиртової барди у псевдозрідженому шарі інертного носія. Для розв'язання цього завдання застосовували теорію подібності. За критерії подібності було взято критерії та геометричний симплекс  $H/d$ , який ураховує певною мірою вплив геометрії у псевдозрідженому шарі:

На рис. 11 показано взаємозв'язок між питоною продуктивністю сушарки та початковою вологістю матеріалу ( $\omega_{п}$ ) за різних температур. Ці дані характеризують ступінь зниження продуктивності сушарки залежно від початкової масової частки вологи в продукті. Чим менша масова частка вологи в продукті, тим менше продуктивність сушарки для випарювання цієї вологи.

Одне із завдань цієї роботи – отримання узагальненого (критеріального) рівняння для сушіння післяспиртової барди у псевдозрідженому шарі інертного носія.

Для розв'язання цього завдання застосовували теорію подібності. За критерії подібності було взято критерії та геометричний симплекс  $H/d$ , який ураховує певною мірою вплив геометрії у псевдозрідженому шарі:

$$Nu = f\left( Ar, Re, Pr, Gu, \frac{H_0}{d} \right) = 0, \quad (2)$$

де  $Nu$  – критерій Нусельта;  $Ar$  – критерій Архімеда;  $Gu$  – критерій Гухмана;  $H_0/d$  – геометричний симплекс.

Для визначення виду критеріального рівняння (2) було проведено серію дослідів. Перша серія дослідів сприяла визначенню функціональної залежності між критеріями  $Nu$  і  $Gu$  за постійності всіх інших критеріїв. Отримані залежності показано на рис. 12 а. Друга серія дослідів була проведена за різних висот щільних шарів інертного носія з однаковою початковою вологістю післяспиртової барди  $\omega_n=45\%$  за постійності інших чинників. Отримана залежність зображена на рис. 12 б. Третя серія дослідів виконана з метою виявлення впливу критерію  $Re$  на швидкість сушіння післяспиртової барди, рис. 12 в. Для визначення впливу критерію  $Ar$  проведено дослідження із сушіння післяспиртової барди в апараті одного діаметра через зміну  $Ar$  від температури рис. 12 г.

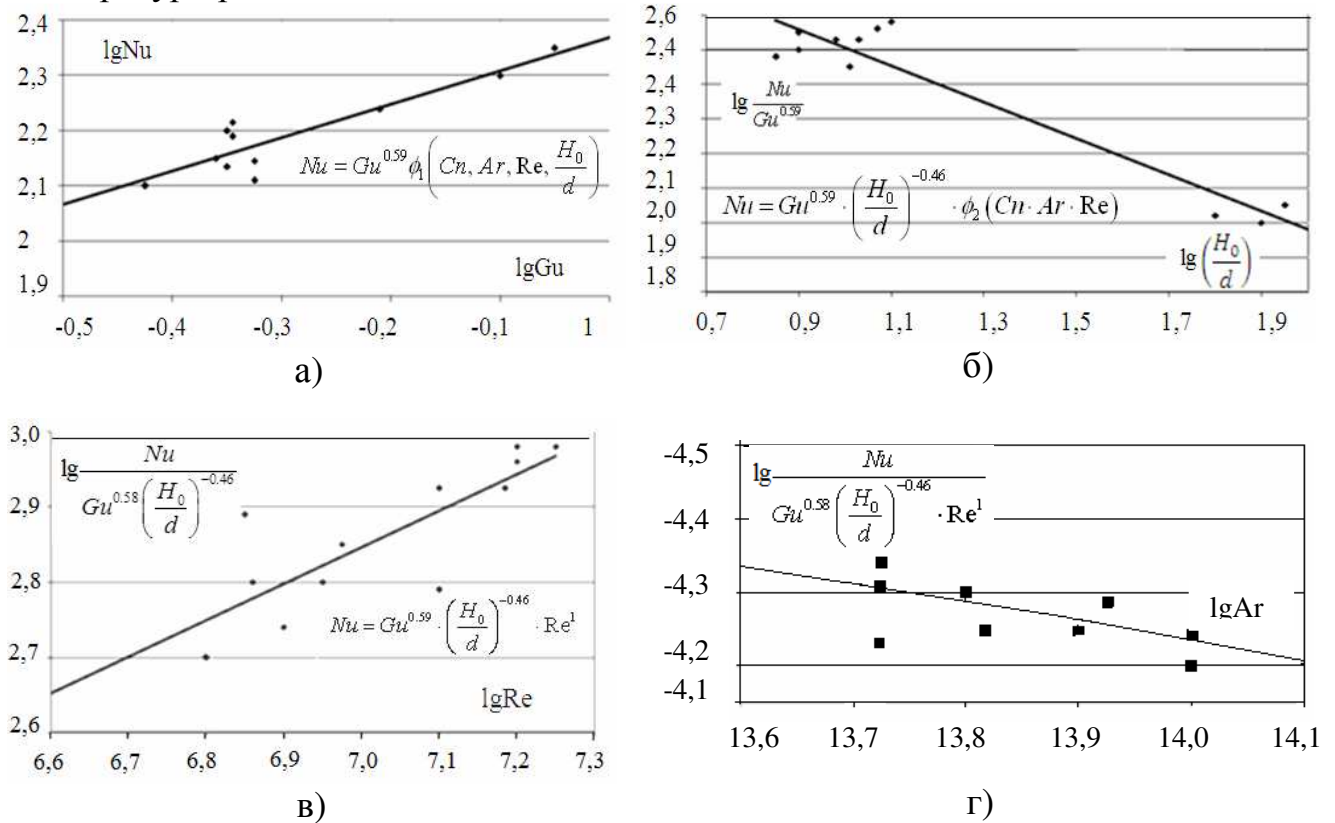


Рис. 12. Розрахункові залежності: а – вплив критерію Гухмана на інтенсивність теплообміну; б – вплив геометричного симплексу на інтенсивність теплообміну; в – вплив критерію Рейнольдса на інтенсивність теплообміну; г – вплив критерію Архімеда на інтенсивність теплообміну

Безрозмірний коефіцієнт  $Cn$  визначається як середній із досліджень для сушіння післяспиртової барди. Отримано середнє значення  $Cn=1,27$ . Кінцеве рівняння має такий вигляд:

$$Nu = 1,27 Ar^{-0.325} \cdot Re^1 \cdot Gu^{0.59} \left( \frac{H_0}{d} \right)^{-0.46} \quad (3)$$

Для рівняння (3) діапазони чисел подібності, у межах яких проводилася обробка експериментальних даних становлять:  $Nu=5,70...9,66$ ;  $Ar=933146...1198590$ ;  $Re=947...1804$ ;  $Gu=0,700...0,809$ ,  $H_0/d=2,415...8,850$ .

У четвертому розділі «Розробка промислової сушильної установки і технологічного процесу переробки післяспиртової зернової барди» розроблено раціональні режими отримання сушеної післяспиртової зернової барди у псевдозрідженому шарі інертного носія та принципову технологічну схему для розробленого способу. Розроблено машинно-апаратну лінію та установку для сушіння (рис. 13) післяспиртової барди у псевдозрідженому шарі інертного носія продуктивністю 1000 кг/год та загальними витратами теплоти  $36 \cdot 10^4$  Вт, де кінцевою продукцією є сушена післяспиртова барда. Слід зазначити, що розроблена установка має спеціально розроблений уловлювач продукту, який запобігає винесенню інертного носія разом із частинками продукту; використання фторопластової крихти, як інертного носія дає змогу інтенсифікувати процес сушіння за рахунок збільшення поверхні тепло- й масообміну; використання вентилятора і калорифера, дозволяє отримати сухий гарячий теплоносій необхідної температури, запобігаючи потемніння сушеної барди.

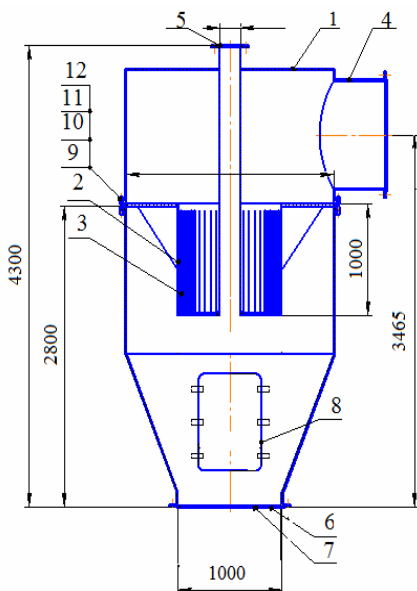


Рис. 13. Установка для сушіння післяспиртової барди: 1 – сушильна камера; 2 – уловлювач продукту; 3 – отвори; 4 – вихідний патрубок; 5 – вхідний патрубок; 6 – газорозподільна решітка; 7 – вхід теплоносія; 8 – люк; 9 – болти; 10 – гайки; 11 – шайба; 12 – прокладка

У п'ятому розділі «Економічне обґрунтування впровадження сушарки у псевдозрідженому шарі інертного носія» розраховано економічний ефект розробки, який досягається внаслідок зменшення кількості використовуваних технологічних операцій, виконання основних операцій в одному апараті

і, як наслідок, зменшення металомісткості використовуваного устаткування та витрат на оплату праці робітникам. Розрахований економічний ефект від впровадження даної технології який складає 10558 тис. грн на рік чистого прибутку за продуктивності цеху 1620 кг/год (по вологому матеріалу). Результати досліджень упроваджено на ДП «Дубов'язівський спиртовий завод» та в навчальному процесі Сумського національного аграрного університету під час викладення теоретичного та практичного курсу «Процеси

та апарати харчових виробництв». Розробки підтверджено патентами України на корисні моделі №48059 «Установка для сушіння харчових продуктів» та №90285 «Спосіб сушіння післяспиртової барди».

## ВИСНОВКИ

1. На основі проаналізованого інформаційного матеріалу доведено перспективність використання сушарок у псевдозрідженому шарі інертного носія та визначено подальші напрямки їх удосконалення.

2. Розроблено експериментальний стенд із дослідження гідродинаміки та процесу тепло- й масообміну сушіння післяспиртової барди, який відрізняється від прототипу наявністю пристрою для уловлення продукту.

3. Експериментально встановлено, що оптимальна температура для сушіння післяспиртової барди у псевдозрідженому шарі інертного носія на вході в сушарку становить  $t=130^{\circ}\text{C}$ , на виході  $t=55^{\circ}\text{C}$ , початковий вологовміст продукту до сушіння  $\omega_{\text{поч}}=45\%$ , після сушіння  $\omega_{\text{кін}}=10\%$ . При цих параметрах досягається максимальна продуктивність сушарки за випареною вологою  $\Delta W=150 \text{ кг/м}^3 \text{ год}$ .

4. Експериментально визначено залежності розрахунку швидкостей псевдозрідження від початку сушіння ( $\varepsilon=\varepsilon_0=0,4$ ) до винесення частинок ( $\varepsilon=1$ ). Згідно запропонованих залежностей швидкість початку псевдозрідження знаходиться у межах 1,6...3 м/с, стійкого режиму псевдозрідження 5...7 м/с, а швидкість, при якій частинки виносяться із сушарки, становить 11...16 м/с.

5. Експериментально одержано емпіричне рівняння для розрахунку діаметра ядра псевдозрідженого шару інертного носія при сушінні післяспиртової барди. Отримане рівняння дає більш точні результати під час розрахунку. Діаметр ядра при порізності шару  $\varepsilon=0,9$  становить 120 мм, це свідчить про те, що в процесі сушіння вся частина псевдозрідженого шару розподілена по всьому об'єму камери і безпосередньо приймає участь у сушінні продукту.

6. На основі аналізу фізичної моделі процесу методом подібних перетворень системи диференційних рівнянь експериментально отримано рівняння теплообміну для сушіння післяспиртової барди на інертних тілах у псевдозрідженому шарі. Для рівняння діапазони чисел подібності, у межах яких проводилася обробка експериментальних даних становлять:  $Nu=5,70...9,66$ ;  $Ar=933146...1198590$ ;  $Re=947...1804$ ;  $Gu=0,700...0,809$ ,  $H_0/d=2,415...8,850$ .

7. Розроблено апаратно-технологічну схему сушіння, отримано патент на корисну модель №90285 «Спосіб сушіння післяспиртової барди». Сушіння барди передбачає розділення продукту на дві фракції: перша рідка фракція направляється на випаровування у вакуум-випарних апаратах, потім упареною подається на сушіння; друга тверда фракція одразу подається на сушіння. Як сушильне обладнання використовується сушарка із псевдозрідженим шаром інертного носія.

8. Розроблено конструкцію сушарки у псевдозрідженому шарі інертного носія, на яку отримано патент на корисну модель №48059 «Установка для



сушіння харчових продуктів». Здійснено впровадження у виробництво сушарки на виробітку пробної партії продукції на ДП «Дубов'язівський спиртовий завод». Розраховано економічний ефект від впровадження даної технології, який складає 10558 тис. грн на рік чистого прибутку за продуктивності цеху 1620 кг/год. (по вологому матеріалу).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Сабадаш С. М. Дослідження процесу сушіння харчових продуктів у псевдозрідженому шарі / С. М. Сабадаш, О. Р. Якуба, В. Б. Тарельник // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Х. : ХДУХТ, 2008. – Вип. 2 (8). – С. 296–303. *Здобувачем проведено дослідження сушіння харчових продуктів в псевдозрідженому шарі інертного носія та отримано рівняння для розрахунку швидкості стійкого фонтанування.*

2. Сабадаш С. М. Скорости псевдооживлення в конических аппаратах / С. М. Сабадаш, А. Р. Якуба, В. В. Касянчук // Вісник Сумського державного університету. Сер. Технічні науки. – 2008. – № 1. – С. 38–41. *Здобувачем експериментально визначено рівняння для початку псевдозрідження стійкого фонтанування та винесення частинок із апарата.*

3. Сабадаш С. М. Дослідження процесу сушіння спиртової барди в псевдозрідженому шарі / С. М. Сабадаш, О. Р. Якуба, // Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: зб. наук. пр. / Харк. нац. техн. ун-т с-г госп. ім. Петра Василенка. Х. : ХНТУСГ, 2009. – Вип. 88. – С. 192–197. *Здобувачем розроблено експериментальний стенд та проведено дослідження сушіння післяспиртової барди в псевдозрідженому шарі.*

4. Сабадаш С. М. Розробка процесу сушіння післяспиртової барди на інертних тілах і вивід критеріальної залежності / С. М. Сабадаш, О. Р. Якуба, Д. Д. Казаков // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 1. – С. 65-70. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.** *Здобувачем проведено експериментальні дослідження, у результаті яких отримано рівняння теплообміну для сушіння післяспиртової барди, яке дозволяє оцінити оптимальні умови сушіння.*

5. Пак А. О. Определение дисперсного состава послеспиртовой зерновой барды / А. О. Пак, С. М. Сабадаш, И. Н. Павлюк // Вестник Алматинского технологического университета. – 2015. – №2. С. 43-47. **Стаття у науковому періодичному виданні Республіки Казахстан.** *Здобувачем проведено експериментальні дослідження з визначення дисперсного складу післяспиртової барди.*

6. Пат. на корисну модель 48059 Україна, МПК А 23, L 3/40. Установка для сушіння харчових продуктів / С. М. Сабадаш, О. Р. Якуба ; заявник та патентовласник Сум. нац. аграр. ун-т. – № u 2009 07628 ; заявл. 20.07.2009 ; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5. – 4 с: *Здобувачем проведено патентний пошук, аналіз і систематизацію результатів, підготовлено заявку на корисну модель.*

7. Пат. на корисну модель 90285 Україна, МПК F 26 B 3/00. Спосіб сушіння післяспиртової барди / С. М. Сабадаш, О. Р. Якуба ; заявник та патентовласник Сум. нац. аграр. ун-т. – № u 201310927 ; заявл. 12.09.2013 ; опубл. 26.05.2014, Бюл. № 10. – 4 с. *Здобувачем проведено патентний пошук аналіз і систематизацію результатів, підготовлено заявку на корисну модель.*

8. Якуба О. Р. Дослідження процесу сушіння харчових продуктів у псевдозрідженому шарі / О. Р. Якуба, С. М. Сабадаш // Аграрний форум 2008 : Міжнар. наук.-практ. конф., 15–18 жовтня 2008 р. : матеріали. Сум. нац. аграр. ун-т. – Суми : СНАУ, 2008. – С. 288–289. *Здобувачем проведено експериментальні дослідження сушіння барди на інертних тілах у псевдозрідженому шарі.*

9. Сабадаш С. М. Швидкості псевдозрідження в конічних апаратах / С. М. Сабадаш, О. Р. Якуба // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини: Всеукр. наук.-практ. конф. 31 жовтня 2008 р. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. – Харків : ХДУХТ, 2008. С. 25 – 26. *Здобувачем отримані залежності розрахунку швидкостей псевдозрідження в конічних апаратах.*

10. Сабадаш С. М. Дослідження впливу визначальних критерії вподібності на процес сушіння післяспиртової барди / С. М. Сабадаш, О. Р. Якуба // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини : Всеукр. наук.-практ. конф., 3–4 листопада 2011 р. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. – Харків : ХДУХТ, 2011. – 80 С. 81. *Здобувачем експериментально визначено вплив вхідних параметрів на коефіцієнт тепловіддачі.*

11. Сабадаш С. М. Дослідження впливу вхідних параметрів на процес сушіння післяспиртової барди / С. М. Сабадаш, О. Р. Якуба // Проблеми харчових технологій і харчування. Сучасні виклики і перспективи розвитку : Міжнар. наук.-техн. конф., 7–9 вересня 2011 р. : матеріали. – Донецьк : ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2011. – С. 95–99. *Здобувачем проведено статистичний метод планування експерименту.*

12. Радчук О. В. Визначення діаметра ядра фонтануючого шару / О. В. Радчук, С. М. Сабадаш // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності : Міжнар. наук.-практ. конф., 8–11 вересня 2015 р. : Харк. держ. ун-т харч. та торг. – Харків : ХДУХТ, 2015. – С. 95–96. *Здобувачем одержано теоретичне рівняння для розрахунку діаметра центрального фонтануючого ядра.*

13. Якуба О. Р. Розробка промислової сушильної установки переробки післяспиртової зернової барди / О. Р. Якуба, С. М. Сабадаш // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини: Всеукр. наук.-практ. конф., 29 жовтня 2015 р. / Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі – Харків : ХДУХТ, 2015. – С. 33–34. *Здобувачем розроблено метод сушіння післяспиртової зернової барди на промисловій сушильній установці.*

## АНОТАЦІЯ

Сабадаш С.М. Обґрунтування енергоефективного процесу сушіння післяспиртової барди. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Харківський державний університет харчування та торгівлі Міністерства освіти і науки України, Харків, 2016.

Дисертацію присвячено обґрунтуванню енергоефективного процесу сушіння післяспиртової барди у псевдозрідженому шарі інертного носія.

Науково обґрунтовано доцільність використання сушарок у псевдозрідженому шарі інертного носія для сушіння післяспиртової барди.

Визначено оптимальні показники для сушіння післяспиртової барди у псевдозрідженому шарі інертного носія. Встановлені залежності розрахунку швидкостей псевдозрідження від початку сушіння до винесення частинок. Одержано емпіричне рівняння для розрахунку діаметра ядра псевдозрідженого шару інертного носія при сушінні післяспиртової барди. Отримано рівняння теплообміну для сушіння післяспиртової барди на інертних тілах у псевдозрідженому шарі. Розроблено принципову технологічну схему, конструкцію апарата для сушіння післяспиртвих барди у псевдозрідженому шарі інертного носія. Розраховано економічну ефективність від впровадження даної технології. Упроваджено результати досліджень у виробництво та навчальний процес.

*Ключові слова:* псевдозріджений шар, післяспиртова барда, інертний носій, дисперсність, енергоефективність, сушіння.

## АННОТАЦИЯ

Сабадаш С.М. Обоснование энергоэффективного процесса сушки послеспиртовой барды. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. – Харьковский государственный университет питания и торговли Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2016.

Диссертация посвящена обоснованию энергоэффективного процесса сушки послеспиртовой барды в псевдоожигенном слое инертного носителя.

Научно обоснована целесообразность использования сушилок в псевдоожигенном слое инертного носителя для сушки послеспиртовой барды.

Определены оптимальные показатели для сушки послеспиртовой барды в псевдоожигенном слое инертного носителя. Установлены зависимости расчета скоростей псевдоожигения от начала сушки до вынесения частиц. Получено эмпирическое уравнение для расчета диаметра ядра псевдоожигенного слоя инертного носителя при сушке послеспиртовой барды. Получено уравнение теплообмена для сушки послеспиртовой барды на инертных телах в

псевдооживленном слое. Разработана принципиальная технологическая схема, конструкция аппарата для сушки послеспиртовой барды в псевдооживленном слое инертного носителя. Рассчитана экономическая эффективность от внедрения данной технологии. Внедрены результаты исследований в производство и учебный процесс.

*Ключевые слова:* псевдооживленный слой, послеспиртовая барда, инертный носитель, дисперсность, энергоеффективность, сушка.

## ANNOTATION

Sabadash S.M. Substantiation of energy-efficient drying process of DDGS. – As a manuscript.

Thesis for Candidate's degree of technical sciences by specialty 05.18.12 – Processes and Equipment of Food, Microbiological and Pharmaceutical Industries.– Kharkiv State University of Food Technology and Trade of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2016.

The thesis is devoted to the energy-efficient drying process of DDGS in pseudo liquefied layer of inert media.

The actuality of the thesis, formulates the goal and objectives of the research scientific novelty and practical value of the work set out information about the testing of work of publication the author provided a General characterization of the work. It was given a General characterization of DDGS as an object of drying, it is shown its chemical composition, and the feasibility of its processing.

Analysis of native and dried DDGS for various indicators and review of domestic and foreign publications on the relevant issues allowed us to formulate the basic requirements for the drying process dictated by the tendencies of development of modern market relations and increase of resources of protein due to the use of secondary raw materials: the choice of optimal process parameters that will ensure high organoleptic and structural-mechanical and technological properties; the use of energy-saving technologies that will ensure the competitiveness of dried products; creation of flexible technologies and user-friendly equipment that allows you to quickly respond to the demand of a certain product.

The optimal temperature for drying DDGS in the fluidized bed of inert media entering the dryer is  $t=130^{\circ}\text{C}$ , the output  $t=55^{\circ}\text{C}$ , the initial moisture content of the product before drying  $\omega_{\text{init}}=45\%$ , after drying  $\omega_{\text{fin}}=10\%$ . These settings achieve the maximum performance of the dryer at the evaporated moisture  $\Delta W=150 \text{ kg/m}^3$  an hour.

The dependence of the calculation of the velocity of fluidization from the beginning of drying ( $\varepsilon=\varepsilon_0=0,4$ ) before rendering the particles ( $\varepsilon=1$ ). According to the proposed dependency of the speed of onset of fluidization is in the range of 1.6...3 m/sec, a steady state of fluidization 5...7 m/sec, and the speed at which particles are carried out of the dryer is 11...16 m/sec.

The obtained empirical equation to calculate the diameter of the nucleus pseudoarcan layer of inert carrier for drying DDGS. The resulting equation gives more accurate results in the calculation. The diameter of the core when portnot layer

$\varepsilon=0,9$  is 120 mm, it suggests that the drying process is all part pseudoarcana the ball distributed throughout the volume of the chamber and directly participates in the dryer.

The resulting equation of heat transfer for drying of DDGS on inert solids in the fluidized bed. Equations for ranges of similarity numbers, which has carried out processing of the experimental data are:  $Nu=5,70...9.66$ ;  $Ar=933146...1198590$ ;  $Re=947...1804$ ;  $Gu=0,700...0,809$ ,  $H_0/d=2,415\ 8,850$ .

Developed hardware and technological scheme of drying, obtained a patent for useful model №90285 «Method of drying DDGS». Drying of stillage provides for the separation of the product into two fractions: the first liquid fraction is sent for evaporation in a vacuum evaporation apparatus, and then uparrow is supplied to the drying; the second solid fraction is fed directly to the dryer. The dryer equipment used dryer fluidized bed of inert carrier.

The design of fluidized bed dryers inert carrier, which received a patent for utility model №48059 «Equipment for drying food." Done manufacturing application dryers to output a test batch of products to SE "Dubovyazovski distillery." The economic effect of the introduction of this technology, which is 10,558 thousand USD per year net profit for the performance workshop 1620 kg/h.

*Key words:* pseudoarcana layer, a bard, an inert carrier, dispersion, energy efficiency, drying.

---

Підписано до друку 10.10.2016 р. Формат 60×90/16. Папір офсет. Друк офсет.  
Умов. друк. арк. 1,4. Тираж 130 прим. Заовл. №

---

Видавець і виготівник

Харківський державний університет харчування та торгівлі,  
вул. Клочківська, 333, Харків, 61051.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №4417 від 10.10.2012 р.