

УДК 669.653.1

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.2.45>

КРИТЕРІАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ ПРОЦЕСУ ГІДРАТАЦІЇ БОРОШНА В УМОВАХ ЗАВИСЛОГО СТАНУ

Стадник І. Я. – доктор технічних наук, професор,
професор кафедри обладнання харчових виробництв
Тернопільського національного технічного університету
ORCID ID: 0000-0003-4126-3256
Scopus-Author ID: 57202160255

Піддубний В. А. – член-кореспондент Національної академії аграрних наук,
доктор технічних наук, професор, директор
Державної наукової установи «Український науково-дослідний інститут
спирту і біотехнологій продовольчих продуктів»
ORCID ID: 0000-0002-1497-7133
Scopus-Author ID: 57224251838

Євчук Я. В. – кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри харчових технологій
Уманського національного університету
ORCID ID: 0000-0002-8624-3825

Радченко Ю. І. – незалежний дослідник, президент
Компанії «Дармі Фабарм» Віа Аверольда
ORCID ID: 0009-0001-7435-0738

У статті досліджено процес адсорбції рідких компонентів з борошном під час замішування тіста в умовах дискретної дії тістомісильної машини. Актуальність роботи зумовлена потребою в глибшому розумінні початкових етапів формування тіста, зокрема процесів гідратації та масопереносу, які визначають фізико-хімічні властивості кінцевого продукту. Особливу увагу приділено моделюванню процесів, що відбуваються у завислому стані, за якого забезпечується інтенсифікація змішування, збільшується міжфазна поверхня взаємодії, зменшуються енерговитрати на подолання гідравлічного опору. Відзначено, що при даному методі ведення процесу створюються сприятливі умови для його інтенсифікації, збільшується міжфазна поверхня дотику, покращується теплообмін і масообмін, зменшується розхід енергії на подолання гідравлічного опору системи. Детально проаналізовано, що змішування борошна із рідиною оцінюється за різними показниками, такими як дискретність, пластичність, структура, технологічна якість суміші та ефективність наступних технологічних операцій. Розкрито, що сорбційна здатність борошна є критично важливим параметром, що визначає його функціональні властивості в процесі замішування. Відзначено, що борошно є активним середовищем, здатним взаємодіяти з водою та іншими компонентами, що впливає на його вологість, текстуру та структуру кінцевого продукту. Виділено два періоди адсорбції – з постійною та зниженою швидкістю. Для кожного періоду запропоновано відповідні критеріальні рівняння з урахуванням гідродинамічних, дифузійних і геометричних параметрів. Проаналізовано роль камери «відпочинку» як зони попередньої гідратації, в якій закладаються основи структури тіста.

Результати дослідження мають практичну цінність і можуть бути використані для оптимізації параметрів замішування, удосконалення конструкції тістомісильних машин та впровадження енергоефективних технологій у харчовій галузі.

Ключові слова: тістомісильна машина, адсорбція, дифузія, камера «відпочинку», критерій Рейнольдса, критерій Фур'є, масоперенос, теорія подібності.

Stadnik I. Ya., Piddubny V. A., Yevchuk Ya. V., Radchenko Yu. I. Criteria approach to analysis of flour hydration process in steady state conditions

The article investigates the process of adsorption of liquid components with flour during dough mixing under conditions of discrete operation of a dough mixer. The relevance of the work is due to the need for a deeper understanding of the initial stages of dough formation, in particular the processes of hydration and mass transfer, which ensure the physicochemical properties of the final product. Particular attention is paid to modeling processes that occur in a suspended state, which ensures intensification of mixing, increases interphase surface interaction, and reduces energy consumption for overcoming hydraulic resistance. It is noted that this method of conducting the process creates favorable conditions for its intensification, increases the interfacial contact surface, improves heat and mass transfer, and reduces energy consumption to overcome the hydraulic resistance of the system. It is analyzed in detail that the mixing of flour with liquid is evaluated by rapid indicators such as discreteness, plasticity, structure, technological quality of the mixture, and the efficiency of subsequent technological operations. It was found that the sorption capacity of flour is a critically important parameter that utilizes its functional properties in the mixing process. It is noted that flour is an active medium capable of interacting with water and other components, which affects its moisture content, consistency and structure of the final product. Two adsorption periods are distinguished – with a constant and reduced speed. For each period, the corresponding criterion equations are proposed, taking into account hydrodynamic, diffusion and geometric parameters. The role of the “rest” chamber as a zone of preliminary hydration, in which the foundations of the dough structure are laid, is analyzed. The research results have practical value and can be used to optimize mixing parameters, improve the design of dough mixers, and implement energy-efficient technologies in the food industry.

Key words: dough mixer, adsorption, diffusion, “rest” chamber, Reynolds criterion, Fourier criterion, mass transfer, similarity theory.

Постановка проблеми. Якісна взаємодія борошна із рідиною у робочій камері тістомісильної машини визначає хід технологічного процесу виробництва продукції. Проаналізувавши взаємодію даних компонентів із наукових досліджень, зробивши пілотну модель тістомісильної машини, спробували розкрити встановлення процесу адсорбції у робочій камері [1, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній промисловій практиці замішування з’явилися новітні прогресивні технології взаємодії твердої фази з рідиною у стані вільного падіння. Одним із прикладів є технологія «Rapidoget» компанії «Diosna», розроблена Берхардом Ноллем. За цієї методикою частинки борошна у вільному падінні зустрічаються з рідкими компонентами, які подаються зі швидкістю 200–500 км/год через спеціальні сопла. Внаслідок цього вони миттєво змочуються, ударяються об стінки змішувальної камери під високим тиском, взаємодіють між собою та утворюють тісто. У конструкції нової тістомісильної машини дискретної дії інтегровано принципи вільного падіння, вібраційної та механічної дії [1, 2].

Ряд фундаментальних досліджень процесу розчинення твердих частинок у рідині були проведені Г. А. Аксельрудом, П. Г. Романковим та обґрунтовані В. С. Шалугінім й В. М. Шмандієм [3]. На основі експериментів Шиловим було запропоновано рівняння, яке описує роботу шару сорбенту (борошна) в динамічних умовах. Воно встановлює залежність довжини шару від часу:

$$\tau = KL - \tau_0$$

де, τ – час захисної дії шару, хв;

L – довжина шару, см;

K – коефіцієнт захисної дії – величина, яка зв’язана з швидкістю поступального руху води у системі борошно-вода після завершення початкового періоду, коли утворюється область градієнта і швидкість подальшого руху стала постійною, хв/см;

τ_0 – час, необхідний для утворення шару (борошно насичується водою у системі і утворює перші шматки тіста).

Дане рівняння дозволяє кількісно оцінити сорбційну здатність борошна як активного середовища, що реагує на контакт з рідиною, та описує перехід від початкової гідратації до сталого поглинання вологи. Воно є основою для прогнозування поведінки борошна в процесах змішування чи зволоження – критичних етапах формування структури тіста.

Швидкість просування води через шар борошна, а відповідно і час досягнення рівноваги в системі, залежить від значення коефіцієнта K . У перший період роботи тістомісильної машини процес адсорбції має гетерогенний характер, типовий для початкової взаємодії компонентів. Вважається [4, 6], що адсорбція відбувається майже миттєво при контакті частинок борошна з водою, а швидкість процесу лімітується лише дифузією вологи до поверхні частинок за атмосферного тиску. Сучасні дослідження акцентують увагу на впливі швидкості змішування [3, 5], мікроструктурі тіста, а також застосуванні математичного моделювання для опису гідратаційних процесів. Такий спрощений підхід, хоча й зручний для початкового аналізу, не враховує складність переносу маси та енергії у системі, що змінюється в часі.

Особливо недостатньо вивченим залишається механізм формування первинних зв'язків між частинками та перехід від поверхневої до внутрішньої сорбції. Ці аспекти вимагають подальшого дослідження з урахуванням реологічних властивостей тіста та динаміки його структуроутворення. Це дозволяє глибше зрозуміти закономірності формування структури тіста та оптимізувати параметри технологічного процесу.

Метою роботи є аналіз динамічних характеристик адсорбції в умовах механічної дії при замішуванні тіста та розробка підходів до математичного опису початкового етапу взаємодії борошна з водою. Особлива увага приділяється моделюванню процесів та виявленню параметрів, що впливають на швидкість і ефективність утворення тіста.

Матеріали і методи дослідження. За рецептурою, розробленою авторами, борошно у вільному падінні дозується у змішувальну камеру і змочується направленим вниз нахиленим струменем рідких компонентів. Струмінь рідких компонентів утворюється нагнітальним пристроєм, який містить дев'ять отворів у вигляді сопел. Швидкість змінювали від 2 до 3 л/хв. Величина швидкості відповідала швидкості, при якій шар сорбенту переходив у завислий стан. Напір подачі компонентів регулювався висотою установки дозатора.

Струмінь рідких компонентів зустрічаються із розпиленими частинками борошна при його вільному падінні. Завдяки конфігурації місильної камери, струмені автоматично сходять донизу, де на них діє захват місильного органу. При цьому час від моменту входу борошна і рідких компонентів у змішувальну камеру і до його подачі у нижню частину камери, складає $\tau_1 = 5\text{--}10$ с. На рисунку подано схему взаємодії компонентів в робочій камері машини.

При вивченні процесу адсорбції в камері, вважаємо, що кінетика гетерогенної реакції визначається концентрацією компонентів та умов проходження процесу. Припускаємо, що швидкість процесу адсорбції визначається швидкістю дифузії, тобто весь процес проходить в основному у дифузійній області, який умовно розділяємо на два періоди. Перший період адсорбції – період, який характеризується мірою води, яку адсорбент – борошно сприймає за час τ_1 , до контакту поверхні місильного органу та місильної камери. Цю ділянку зображено на рис. 1, площею ABCD. Регулювання площі визначає швидкість адсорбції і якість.

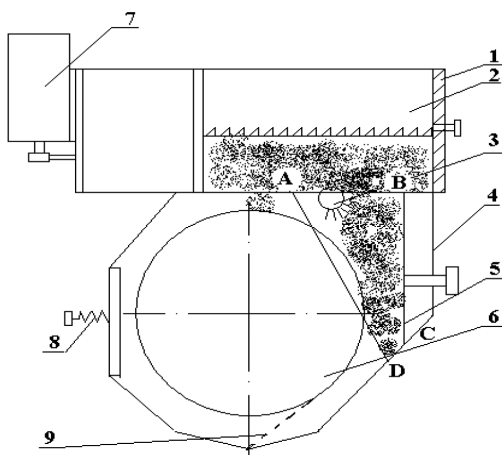


Рис. 1. Схема експериментальної тістомісильної машини: 1 – вібратор борошна; 2 – борошно; 3 – нагнітальний пристрій рідких компонентів; 4 – місильна камера; 5 – регулюючий пристрій камери відпочинку; 6 – місильний орган; 7 – електродвигун постійного струму; 8 – регулятор консистенції; 9 – шиббер вигрузки тіста

Виклад основного матеріалу. У процесі дослідження адсорбції в місильній камері приймається, що кінетика гетерогенної реакції визначається концентрацією компонентів та умовами перебігу процесу. Швидкість адсорбції на початковому етапі здебільшого визначається зовнішньою дифузією вологи до поверхні частинок борошна, тобто перебіг реакції відбувається переважно в дифузійній області.

Дифузійний процес умовно поділяється на два етап: перший період адсорбції (до контакту борошна з місильним органом) характеризується поверхневою активністю частинок і формуванням первинних міжмолекулярних зв'язків. Його тривалість (τ_1), площа ABCD на графіку та об'єм поглинутої вологи дозволяють оцінити сорбційну здатність борошна та є технологічним критерієм його якості. Регулюючи цей етап, можна впливати на рівномірність гідратації й однорідність тіста.

Другий період адсорбції починається з моменту активного механічного перемішування, коли місильний орган контактує з масою інгредієнтів. На цьому етапі відбувається глибша гідратація – волога проникає в капілярно-пористу структуру частинок борошна, що ускладнюється через формування в'язкопружного середовища. Під дією механічних зусиль посилюється утворення водно-білкових зв'язків, і починається формування глютенівної сітки. Саме на цьому етапі формуються основні фізико-механічні властивості тіста.

Тривалість і характер перебігу другого періоду залежать від типу борошна, його вологості, інтенсивності перемішування, температурних умов тощо. Оптимальне співвідношення між першим і другим періодами адсорбції дозволяє досягти стабільної якості тіста.

У промисловій практиці перший період триває від моменту подачі інгредієнтів до завершення дозування одного з них – зазвичай борошна. Рідкі компоненти, як правило, дозуються на 20–30 секунд довше. Існують два варіанти цього процесу: одночасна подача інгредієнтів з частковим перекриттям подачі води; розтягнута подача рідких компонентів на 20–30 с після завершення дозування борошна (наприклад, затримка 5 с до старту, далі 55 с – подача борошна і ще 20–30 с – подача рідин).

Щоб описати динаміку зміни концентрації у суміші під час перемішування, можна скористатися матеріальним балансом [3]:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{w(c_0 - c)}{V}, \quad (1)$$

де: w – об’ємні витрати сировини на вході ($\text{м}^3/\text{с}$);

c_0 – концентрація на вході ($\text{кг}/\text{кг}$); c – концентрація у камері у момент часу t ;

V – об’єм місильної камери (м^3).

Рівняння (1) є лінійним диференціальним рівнянням першого порядку. Розв’язок при початковій умові $C(0) = C_{\text{поч}}$:

$$C(t) = C_0 + (C_{\text{поч}} - C_0) \cdot e^{-wt/V}. \quad (2)$$

Вираз (2) показує, що концентрація $C(t)$ експоненційно наближається до концентрації на вході C_0 , причому: більші витрати w прискорюють досягнення однорідності, а більший об’єм V сповільнює оновлення складу в камері. Це дозволяє оцінити тривалість процесу перемішування, необхідного для досягнення стабільної однорідності тіста. Час, необхідний для досягнення 95 % від концентрації на вході, становить приблизно 30 секунд. Це означає, що за таких параметрів (об’єм 0.1 м^3 , витрати $0.01 \text{ м}^3/\text{с}$) суміш у місильній камері досягає практично однорідного складу вже за пів хвилини.

Із рівняння (1) видно, що об’ємні витрати борошна, які регулюємо при допомозі вібраційного дозатора, суттєво впливають на зміну концентрації. Суттєве значення має об’єм камери «відпочинку», яку можна в процесі проведення досліджень змінювати. Вона також є камерою попередньої інтенсивної просторової обробки борошна рідкими компонентами. Цей процес триває до 15 с. Таким чином, камера «відпочинку» слугує зоною первинної гідратації, де визначальним є саме гідродинамічний режим.

Подальшому проникненню борошна і рідких компонентів у камеру замішування сприяє місильний орган. Зважаючи на результати досліджень інших авторів щодо адсорбції та одержаних експериментальних даних [5, 7, 9], припущено, що у початковий період швидкість адсорбції переважно визначається зовнішньою дифузійною $R_{\text{зовн}}$ вологи, тоді як внутрішня $R_{\text{вн}}$ залишається другорядною. Основну роль відіграє гідродинамічний режим, що формує умови масопереносу. Однак варто також зазначити, що зі збільшенням часу адсорбції можуть виникати додаткові фактори, які потрібно більш детально розглядати взаємодію між цими факторами для точного моделювання процесу.

У зв’язку з цим, у дослідженні передбачається використання комбінованого підходу – теоретичного аналізу та експериментального моделювання, що базується на принципах теорії подібності [3, 6]. Це дозволить отримати розрахункові рівняння, які будуть застосовані для оптимізації технологічних параметрів: геометричних розмірів камери, швидкості обертання місильного органу, об’ємних витрат борошна і рідких компонентів та їх масового співвідношення.

На основі аналізу літературних джерел [6, 8, 9] та результатів власних експериментів можна припустити, що на початковому етапі адсорбції (період сталої швидкості) ключову роль відіграє швидкість зовнішньої дифузії вологи до поверхні частинок. У цей період значення внутрішньої швидкості ($R_{\text{вн}}$) є порівняно малим, а отже, швидкість процесу контролюється гідродинамічним режимом і умовами подачі компонентів.

Зі збільшенням часу процесу адсорбції поступово починають проявлятися інші фактори, зокрема внутрішня дифузія або насичення поверхні адсорбенту, які

можуть знижувати загальну швидкість процесу. У таких умовах стає необхідним більш детальний аналіз процесу і розробити ефективні режими роботи змішувальної установки.

Функціональна залежність, яка описує процес адсорбції у просторовому шарі методом теорії подібності, виходячи з початкових і граничних умов, є залежність, яка описує кінетику процесу адсорбції в перший період:

$$K_i = f(R_e, P_r, C, \Gamma_1, \Gamma_2), \quad (3)$$

$K_i = \frac{\beta l}{\chi D}$ – модифікований дифузійний критерій Кирпичева;

$Re = \frac{wd}{\nu}$ – критерій Рейнольдса, який описує співвідношення між інерціальними і в'язкісними силами в потоці рідини;

$Pr = \frac{\nu}{\chi D}$ – модифікований критерій Прандтля, що визначає взаємозв'язок між кінематичною в'язкістю та дифузією тепла;

C – симплекс концентрацій, що описує зміни концентрації адсорбату в шарі;

Γ_1, Γ_2 – симплекси геометричної подібності, які визначають вплив геометричних характеристик системи (наприклад, форми та розміру часток адсорбенту) на кінетику процесу.

Функціональна (3) залежність враховує основні фактори, які впливають на процес адсорбції, і є ключовою для розуміння і моделювання адсорбційних процесів в просторових шарах, де важливим є взаємодія між фізичними властивостями потоку та характеристиками адсорбенту. Це припущення є корисним для моделювання періоду з постійною швидкістю, коли процес адсорбції в основному обмежений зовнішньою дифузією, і процес протікає стабільно з визначеною швидкістю.

Однак, коли процес переходить до другого періоду – періоду зниженої швидкості, основним фактором, що визначає швидкість адсорбції, стає внутрішня дифузія. У цей час концентрація адсорбату в шарі борошна зменшується, і внутрішня дифузія молекул або іонів через пори адсорбенту починає мати більше значення, ніж зовнішня дифузія. Швидкість цієї стадії процесу буде залежати від таких фізико-хімічних характеристик борошна, як його пористість, розмір часток, а також від конструкції місильного органу та місильної камери. Чим ефективніше буде механічне перемішування, тим швидше відбуватиметься процес внутрішньої дифузії і, відповідно, зниження швидкості адсорбції на цій стадії.

Внутрішня дифузія є важливим фактором для забезпечення ефективного використання адсорбенту в процесах, де час адсорбції значно більший, і на цьому етапі важливо оптимізувати конструкцію обладнання для мінімізації обмежень, пов'язаних із дифузійними процесами всередині адсорбенту.

За аналогією формується критеріальне рівняння кінетики адсорбції для другого етапу. Вочевидь, що в це критеріальне рівняння, крім критеріїв K_i , R_e , і P_r симплексів концентрації і геометричної подібності, вийде дифузійний критерій Фур'є [2].

$$Fo = \frac{k\tau}{\varepsilon l^2},$$

k – коефіцієнт масопровідності, аналог коефіцієнту температуропровідності α ;
 ε – відносний вільний об'єм між сорбентами, м³/м³.

По аналогії з першим періодом, критеріальне рівняння кінетики адсорбції для другого періоду, де основним фактором є внутрішня дифузія, можна записати наступним чином:

$$J = f(\text{Re}, \text{Sc}, \text{Pr}, \text{Fr}, \Gamma_1, \Gamma_2, k, \varepsilon), \quad (4)$$

Sc – модифікований дифузійний критерій Кирпичева, що характеризує дифузійні процеси;

Fr – дифузійний критерій Фур'є, що відображає вплив температури на дифузійні процеси, але також може бути адаптований для опису масопереносу;

k – коефіцієнт масопровідності, аналогічний коефіцієнту температуропровідності α , який характеризує здатність матеріалу передавати масу через свої пори;

ε – відносний вільний об'єм між сорбентами, що є важливим для оцінки пористості і доступу молекул до внутрішніх поверхонь адсорбенту;

Γ_1, Γ_2 – симплекси геометричної подібності, які враховують геометрію адсорбента і його вплив на внутрішню дифузію.

Рівняння (4) описує кінетику адсорбції під час другого періоду, коли внутрішня дифузія є основним обмежувальним фактором, і є важливим для визначення швидкості процесу в умовах, коли основними факторами, що визначають процес, є фізико-хімічні властивості адсорбенту та конструкція апарату.

Вважаючи, що в другий період процесу $R_{\text{внутр}} \gg R_{\text{зовн}}$ адсорбції також залежить від гідродинамічного режиму процесу. Цьому періоду властива вільна турбулентна дифузія, яка перевищує молекулярну, так як границя розподілу фаз постійно змінюється. Тому буде існувати критеріальна залежність дифузійного критерія Нуссельта $Nu = KR_e^m P_r^n$, для рідинного потоку, яка справедлива для умов поверхонь фазового контакту.

В загальному вигляді критеріальна залежність кінетики адсорбції у другому періоді може бути визначена:

$$\frac{c}{c_0} = f(R_e, N_u, F_0, \Gamma_1 \Gamma_2 P). \quad (5)$$

Критерій Нуссельта Nu для турбулентного потоку виражає ефективність масопереносу і є функцією чисел Рейнольдса та Шмідта:

$$Nu = C \cdot \text{Re}^m \cdot \text{Sc}^n, \quad (6)$$

де C, m, n – емпіричні константи, які залежать від конкретної системи.

Критеріальна залежність (6) описує кінетику адсорбції під час другого періоду, коли основним фактором є внутрішня турбулентна дифузія, що сприяє швидшому переносу маси через адсорбент.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що процес адсорбції рідких компонентів під час замішування тіста складається з двох періодів: перший період характеризується сталою швидкістю, обмеженою зовнішньою дифузією; другий період – зниженою швидкістю, де провідну роль відіграє внутрішня дифузія в капілярно-пористій структурі борошна. Для кожного з періодів розроблено критеріальні рівняння, що враховують основні гідродинамічні, дифузійні та геометричні чинники, зокрема критерії Рейнольдса, Шмідта, Прандтля, Фур'є та Нуссельта. Особлива увага приділена камері «відпочинку» – зоні попередньої об'ємної гідратації, що забезпечує рівномірний розподіл вологи до початку інтенсивного перемішування.

Обґрунтовано доцільність застосування теорії подібності, що дозволяє ефективно моделювати процес гідратації, підвищити продуктивність установок і забезпечити стабільну якість тіста.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення конструкцій тістомісильних машин дискретної дії та впровадження автоматизованих систем управління технологічними процесами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Берник І. М., Новгородська Н. В., Соломон А. М., Овсієнко С. М., Бондар М. М. Інноваційні технології харчових виробництв: монографія. Вінниця: Видавець ФОП Кушнір Ю. В., 2022. 300 с.
2. Стадник І. Я., Паньків Ю. Ю., Піддубний В. А. (2020). Визначення питомої потужності при змішуванні компонентів. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. Т. 26, № 6. С. 142–153. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npukht_2020_26_6_16
3. Шалугін В. С., Шмандій В. М. Процеси та апарати промислових технологій. Навчальний посібник. К. : Центр учбової літератури, 2008. 392 с.
4. Derkach, A., Stadnyk, I., Piddubnyi, V., et al., (2024): Achievements and problems in studying the mechanism of thermal potential transfer regulation between liquids. In: *Machinery & Energetics*. Vol. 15, No. 1, pp. 104–117.
5. Деркач А. Кравченко Р., Стадник І., Радченко Ю., Піддубний В. 2024. Вплив параметрів змішувача на однорідності суміші при змішуванні компонентів у хлібопекарській галузі. *Технічна інженерія* № 1(93–24) Житомир. 52–58 с.
6. Stadnyk I., V Piddubnyi, Mykhailyshyn, Petrychenko, V. Fedoriv, V. Kaspru (2021) The influence of rheology and design of modelling rolls on the flow and specific gravity during dough rolling and injection. *Journal of Advanced Manufacturing System*. Vol. 22, No. 01. 35–48. [shttps://doi.org/10.1142/S021](https://doi.org/10.1142/S021)
7. Zhao, X. et al. (2019) Reaction–diffusion approach to modeling water diffusion in glutinous rice flour particles during dynamic vapor adsorption. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 4605–4615. Моделювання дифузії води в частинках борошна під час динамічної адсорбції.
8. Ye, H. et al. (2024) *Dynamic Study on Water State and Water Migration during Gluten–Starch Model Dough Development under Different Gluten Protein Contents*. *Foods*, 13(7), 996.
9. Дробот В. Технологія хлібопекарського виробництва. Київ : Логос, 2002. 366 с.

REFERENCES:

1. Bernyk I. M., Novgorodska N. V., Solomon A. M., Ovsienko S. M., Bondar M. M. (2022). *Innovatsiyni tekhnolohiyi kharchovykh vyrobnytstv*. [Innovative technologies of food production]. Monohrafiya. [Monograph]. Vinnytsia: Yu. V. Kushnir Publishing House. 300 p. [in Ukrainian].
2. Stadnik I. Ya., Pankiv Yu. Yu., Piddubny V. A. (2020). Determination of specific power when mixing components. *Scientific works of the National University of Food Technologies*. Vol. 26, No. 6. P. 142–153. Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npukht_2020_26_6_16
3. Shalugin V. S., Shmandiy V. M. Processes and devices of industrial technologies. *Textbook*. – K. : Center of educational literature, 2008. 392 p.
4. Derkach, A., Stadnyk, I., Piddubnyi, V., et al., (2024): Achievements and problems in studying the mechanism of thermal potential transfer regulation between liquids. In: *Machinery & Energetics*. Vol. 15, No. 1, pp. 104–117.
5. Derkach A. Kravchenyuk R., Stadnik I., Radchenko Yu., Piddubny V. 2024. The influence of mixer parameters on the homogeneity of the mixture when mixing

components in the baking industry. *Technical Engineering* No. 1(93–24) Zhytomyr. 52–58 s.

6. Stadnyk I., V Piddubnyi, Mykhailyshyn, Petrychenko, V. Fedoriv, V. Kaspru (2021) The influence of rheology and design of modelling rolls on the flow and specific gravity during dough rolling and injection. *Journal of Advanced Manufacturing System*. Vol. 22, No. 01. 35–48. <https://doi.org/10.1142/S021>

7. Zhao, X. et al. (2019) Reaction–diffusion approach to modeling water diffusion in glutinous rice flour particles during dynamic vapor adsorption. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 4605–4615.

8. Ye, H. et al. (2024) *Dynamic Study on Water State and Water Migration during Gluten–Starch Model Dough Development under Different Gluten Protein Contents*. *Foods*, 13(7), 996.

9. Drobot V. (2002) *Tekhnolohiia khlibopekarskoho vyrobnytstva* [Bakery production technology]. Kyiv : Lohos, 366 s.