

## ДИНАМІКА МІЖФАЗОВОЇ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ КОМПОНЕНТАМИ ПРИ ПЕРЕМІШУВАННІ

**І. Я. СТАДНИК,**

доктор технічних наук, професор кафедри обладнання харчових технологій, <https://orcid.org/0000-0003-4126-3256>

E-mail: [igorstadnykk@gmail.com](mailto:igorstadnykk@gmail.com)

Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя

**В. В. САРАНА,**

кандидат технічних наук, доцент кафедри процесів і обладнання переробки продукції АПК, <https://orcid.org/0000-0002-5102-2264>

E-mail: [saranavv@ukr.net](mailto:saranavv@ukr.net)

**М. М. МУШТРУК,**

кандидат технічних наук, доцент кафедри процесів і обладнання переробки продукції АПК, <https://orcid.org/0000-0002-3646-1226>

E-mail: [mixej.1984@ukr.net](mailto:mixej.1984@ukr.net)

**В. П. ВАСИЛІВ,**

кандидат технічних наук, доцент кафедри процесів і обладнання переробки продукції АПК <https://orcid.org/0000-0002-2109-0522>

E-mail: [vasiliv-vp@ukr.net](mailto:vasiliv-vp@ukr.net)

**М. М. ЖЕПЛІНСЬКА,**

кандидат технічних наук, доцент кафедри процесів і обладнання переробки продукції АПК <https://orcid.org/0000-0002-7286-3003>

E-mail: [jeplinska@ukr.net](mailto:jeplinska@ukr.net)

**І. П. ПАЛАМАРЧУК,**

доктор технічних наук, професор кафедри процесів і обладнання переробки продукції АПК, <https://orcid.org/0000-0002-0441-6586>

E-mail: [vibroprocessing@gmail.com](mailto:vibroprocessing@gmail.com)

**З. А. БУРОВА,**

кандидат технічних наук, доцент кафедри процесів і обладнання переробки продукції АПК, <https://orcid.org/0000-0002-4712-6298>

E-mail: [zi-na@ukr.net](mailto:zi-na@ukr.net)

**М. М. ГУДЗЕНКО**

кандидат технічних наук, асистент кафедри процесів і обладнання переробки продукції АПК, <https://orcid.org/0000-0001-7959-3627>

E-mail: [gudzenkomax@ukr.net](mailto:gudzenkomax@ukr.net)

Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Анотація.** Процеси перемішування, збивання й піноутворення за своєю суттю однакові та полягають у диспергуванні газу в рідині. Під час змішування та збивання суміші компонентів унаслідок механічної дії набухлі, збільшені в об'ємі водонерозчинні білкові речовини (клейковинні білки) утворюють тривимірну губчато-сітчасту неперервну структуру. Її називають клейковинним каркасом. Саме він визначає еластичні та пружні властивості середовища.

Тому метою роботи було встановлення взаємозв'язку газоутримувальної здатності середовища та енергії, затраченої на гідратацію компонентів. Дослідженнями виконувалася завдання визначення газоутримувальної здатності середовища зі змінними параметрами висоти рідинної фази від інтенсивності змішування, часу перебігу перехідних процесів формування повного об'єму газорідного середовища, часу перехідного процесу виходу диспергованої газової фази. Різниця рівнів до утворення газової фази й у режимі перемішування (аерації) визначає значення газоутримувальної здатності. У зв'язку з цим, прийшли до висновку про доцільність повної дестабілізації усталених режимів завдяки зміні режимів дії робочого органа в системі потоків. Додатковим впливом на систему є зміна гідродинамічних режимів у зв'язку з несталою динамікою утворення диспергованої газової фази. Генерування диспергованої газової фази означає присутність енергетичних витрат на утворення міжфазної поверхні, що повинно враховуватися в загальному енергетичному балансі. Водночас треба назвати ще одну особливість. Частина газової фази, що існувала і продовжує існувати в новому режимі після змішування, потрапляє в режим перехідного процесу.

Тому найефективніше замішування відбувається в разі дотримання зміщеного режиму дозування компонентів у зваженому стані та механічного впливу робочого органа. З огляду на поставлені завдання і умови проведення змішування опари, визначені вимоги до конструкції змішувача, водночас встановлено, що подача компонентів має тривати не менше 45 с. За цей період відбувається гідратація та зменшення споживання енергоресурсів.

**Ключові слова:** перемішування, тверда, рідка і газоподібна фаза, зміна концентрацій, термодинаміка, гідратація, опара

---

### **Актуальність.**

Початковими умовами змішувального процесу є дотримання рецептури компонентів. Перемішування та збивання напівфабрикатів для хлібопекарського та кондитерського виробництва має свої визначені стадії (Chernenkova et al., 2019; Stadnyk et al., 2021a). Процеси перемішування, збивання й піноутворення за своєю суттю однакові, та полягають у диспергуванні газу в рідині. Така система у збитій масі утримує в основному газо-

ві пузирці. Між собою вони розділені тонкою плівкою рідини. Схематично структуру піни можна уявити, як упаковку бульбашок газу із тонкими плівками основного високодисперсного наповнювача (Stadnyk et al., 2021b).

До числа біополімерів, які беруть участь в утворенні таких систем, належать білки, крохмаль, пентозани, а також оболонкові частини. У процесі перемішування компонентів емульсії (опари) відбуваються складні колоїдні, фізико-хімічні та біохімічні перетворення під дією води і ферментних систем.

Найактивніше протікають колоїдні процеси. У результаті поглинання води білки, крохмаль та пентозани збільшуються в об'ємі, а цукри, мінеральні та водорозчинні речовини й вітаміни переходять у розчин. В утворенні пшеничної опари першорядна роль належить білкам, які поглинають подвійну кількість води в порівнянні зі своєю масою. Осмотично зв'язана волога в них складає 75 %, й абсорбційно зв'язана – 25 %. Саме завдяки осмотично зв'язаній волозі білкова молекула розпушується та збільшується в об'ємі (Danyliuk et al., 2017).

Під час змішування та збивання суміші компонентів унаслідок механічної дії набухлі, збільшені в об'ємі водонерозчинні білкові речовини (клейковинні білки) утворюють тривимірну губчасто-сітчасту неперервну структуру (Lisovska et al., 2017). Її називають клейковинним каркасом. Саме він визначає еластичні та пружні властивості середовища. До складу каркасу входять зерна крохмалю, нерозчинні пентозани, частинки оболонок зерна. Процеси гідратції компонентів середовища відбуваються з різною швидкістю й залежать від температури води. Максимальне набухання білків відбувається за температури 30 °С з водопоглинанням 2,0...2,5 г/г. За вищої температури набухання білків обмежується. Водопоглинання крохмалю становить 0,3...0,4 г/г води на суху речовину. Пентозани поглинають воду осмотично й утворюють в'язкі розчини, наслідком чого є значне підвищення вологопоглинальної здатності і зміцнення консистенції (Stadnyk et al., 2019; Nakov and Ivanova, 2020).

Вважається, що поглинута і зв'язана вода між компонентами розподіляється так, у %: цілі зерна крохмалю – 26,4; ушкоджені зерна крохмалю – 19,1; білки клейковини – 31,2; пентозани – 23,4 (Kolyanovska et al., 2019).

Щодо утвореного змішуванням борошна з водою розрізняють три фази: тверду, рідку та газоподібну. *Тверда фаза* створюється нерозчинними білками, що утворюють клейковинний каркас і забезпечують його розтягуваність та еластичність. *Рідка фаза* є в'язким розчином, який складається зі зв'язаної адсорбційно складовими борошна і води. *Газоподібна фаза* утворюється внаслідок насичення тіста кульками повітря під час змішування та частково внесенням повітря борошном, водою, яйцями, молочним білком, казеїнатом натрію та ін. Вважається, що в загальному об'ємі середовища газова фаза близька до 10 % (Mushtruk et al., 2020).

### Аналіз досліджень.

Значна кількість речовин у середовищі, зміна концентрацій, взаємодії між ними й мікроорганізмами, присутність стимуляторів тощо, призводять до відносної нестабільності системи. За таких умов є напрями за яких оцінюються впливи окремих чинників. Проте негативні наслідки також треба прогнозувати, наприклад, за величинами осмотичних тисків, впливів чинників, погіршення якісних показників продукції тощо. Якщо вплив температури можна прослідкувати, то щодо фізичного тиску остаточної точки зору немає (Palamarchuk et al., 2020; Sukhenko et al., 2019). Проте положення термодинаміки тісно пов'язують параметри тиску й температури, наприклад, у газових законах, рівнянні Менделєєва-Клапейрона, законі Генрі тощо. З погляду технічної доступності у впливах на зброджувані масиви інтерес мають адіабатні або політропні процеси (Osipenko et al., 2019; Savenkova et al., 2019). У зв'язку зі стисканням утворюючої суміші на поверхні камери, частково підвищується темпе-

ратура газової фази. Очевидно, що до стискання системи температури газової фази й опари співпадають. Однак після стискання отримуємо співвідношення температур:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (1)$$

в адиабатному процесі і в політропному,

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} \quad (2)$$

де  $\dot{O}_1$  і  $\dot{O}_2$  – відповідно початкова й кінцева температура газової фази;

$P_1$  і  $P_2$  – відповідно початковий та кінцевий тиск;

$k$  і  $m$  – показники адиабати й політропи.

Енергія, що вводиться в систему за таких умов [6], дорівнює:

$$E = \frac{MR}{k-1} (T_2 - T_1), \quad (3)$$

де  $M$  – маса стиснутого газу;

$R$  – універсальна газова стала.

Введена у такий спосіб енергія має перерозподілятися між дисперговою газовою фазою й опарою, де загальна температура системи зростає.

Відповідно до закону Генрі зростання парціального (а в нашому випадку загального) тиску підвищує розчинність газу в рідинній фазі середовища, а збільшення температури зменшує розчинність:

$$c_n = kP, \quad (4)$$

де  $k$  – константа Генрі.

Цей показник враховує, як коефіцієнт пропорційності впливає на температуру та фізико-хімічні властивості складових системи. Збільшення температури зменшує розчинність  $c_n$  (рис. 1).

На графіку ізотерми  $T_1$  та  $T_2$  вказують, що теоретично можливими є варіанти, за яких розчинність зростає, знижується або залишається сталою зі змінами тиску. Заразом температура середовища відповідно до закону Вант-Гоффа впливає на осмотичний тиск розчину:

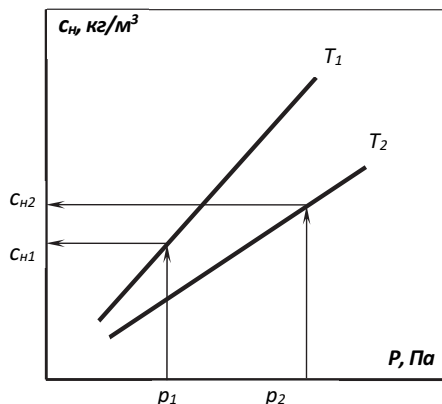


Рис. 1. Графік залежності між параметрами  $c_n$  та  $P$  у відповідності до закону Генрі

$$\pi = CRT, \quad (5)$$

де  $\pi$  – осмотичний тиск розчину, кПа;

$C$  – мольно-об'ємна його концентрація (молярність), кмоль/л;

$R = 8,314$  Дж/(моль·К) – універсальна газова стала.

Молярність розчину  $C$  являє собою відношення кількості розчиненої речовини  $n$  до об'єму розчину  $V$  (л):

$$C = n/V, \quad (6)$$

а кількість речовини дорівнює її масі  $m$ , розділену на мольну масу  $M$ . Звідси маємо:

$$C = \frac{m}{MV} \quad (7)$$

та рівняння Вант-Гоффа:

$$\pi V = \frac{mRT}{M}; \quad \pi = \frac{mRT}{MV}. \quad (8)$$

З останньої умови витікає, що окрім впливу температури  $T$  середовища, яка може обиратися в достатньо помітному діапазоні, значніший вплив на осмотичний тиск досягається завдяки деструкції цукрів та інших органічних полімерів у процесі бродіння, збивання, оскільки кінцевими результатами трансформацій є спирт і діоксид вуглецю та повітря.

Отже, вторинним наслідком зміни тисків у системі є зміна температур диспергованої газової фази, введення додаткової енергії в систему, зміна осмотичних тисків. Первинним же наслідком зміни тиску в середовищі є активне перемішування суміші компонентів. Його перебіг відбувається в умовах об'ємного напруженого стану завдяки стисканню або розширенню газової фази. Водночас важливо, що за таких умов виникає взаємодія між локальними зонами, центрами яких є газові каверни. Виникнення останніх у фізичній суті відповідає явищу розриву суцільності середовища на основі трансформації хімічної енергії з'єднань середовища в механічну потенціальну й одночасно кінетичну енергію зміни форм і розмірів.

Перехідний процес активного газоутворення впливає на зростання газобаритних розмірів масиву середовища і його об'єму. Однак швидкість таких змін є достатньо обмеженою. Зміни об'єму середовища відбуваються в потенціальному полі сил тяжіння, подолання яких здійснюється рушійним чинником потенціальної енергії утвореної газової фази за інтенсивного створення змінних імпульсів діючих сил (Shishkin et al., 2020; Ryvovarov et al., 2021).

Перебіг таких процесів може бути достатньо швидкоплинним. Водночас відбувається поєднання двох процесів, оскільки до імпульсного перемішування додається зброджування цукрів середовища. Наслідком такого поєднання є інтенсифікація масообмінних і біохімічних процесів. Іншими будуть прояви енергетичних імпульсів в умовах різких знижень тиску. Різниця в тисках означає перехід системи до нових параметрів термодинамічної рівноваги зі швидкоплинним наростанням газоутримувальної здатності системи через розширення газової фази з відповідним

доповненням її кількості. Цей факт відбувається у зв'язку з десорбцією розчиненої частини газової фази. Очевидно, що такий перехідний процес стосується не лише газової фази, а однозначно й рідинної, оскільки збільшення об'єму газової фази однозначно визначає зростання об'єму газорідинної суміші й переміщення рідинної фази. Динаміка останнього супроводжується появою сил інерції і, відповідно, збільшенням тиску в частині загального і програмованого його зниження.

Переміщення рідинної фази в результаті утворення диспергованої газової фази здійснюється вертикально робочої камери. Утворена газорідинна система в динаміці з пружними системами твердих тіл із розподіленими масами призводить до висновку про їх еквівалентність і про можливість застосування принципу релея для визначення приведеної маси рідинної фази. Наявність даних щодо мас досліджуваної системи і силових дій на неї означає можливість використання принципу Лагранжа-Делаμβера в її моделюванні. Визначення рушійного чинника пов'язується з динамікою зміни швидкості руху і тисків. Їх реакції на імпульсне енергетичне збурення будуть збігатися, оскільки генераторами механічного впливу за зниження тисків є сама газова фаза.

**Мета досліджень** полягає у встановленні взаємозв'язку газоутримувальної здатності середовища та енергії, затрачуваної на гідратацію компонентів.

### **Матеріали та методи дослідження.**

Дослідженнями виконувалася задача визначення газоутримувальної здатності середовища зі змінними параметрами висоти рідинної фази  $h_{p.f.}$  від

інтенсивності змішування, часу перебігу перехідних процесів формування повного об'єму газорідного середовища, часу перехідного процесу виходу диспергованої газової фази.

Різниця рівнів до утворення газової фази й в режимі перемішування (аерації) визначає значення газотримувальної здатності. Початок і завершення перебігу перехідних процесів (одержання однорідної маси) фіксувався візуально. Зміна висоти рідинної фази супроводжувалася аналогічно до циклу змін параметрів впливу.

Виклад основного матеріалу. Зміна  $\Delta h$  висоти набухлого газорідного шару порівняно з висотою рідинного означала можливість визначення величини газотримувальної здатності:

$$u_{г.р.с.} = \Delta h f, \quad (9)$$

де  $f$  – площа перерізу робочої камери. За внутрішнього діаметру камери  $d = 0,15$  м маємо  $f = 0,0177$  м<sup>2</sup>.

Результати вимірів первинних даних наведені у табл. 1.

Аналіз одержаних даних приводить до очікуваного висновку про зростання газотримувальної здатності в системі за інтенсивного змішування компонентів, що впливає на збільшення газового потоку на аерацію і висоту рідинної фази. Водночас фіксується ефект перехідного процесу, за яким стабілізація швидкості газової фази відбувається на висоті 0,15...0,2 м над площиною її введення в рідину. Графічна інтерпретація результатів

табличних даних наведена на рис. 2.

Виконання перехідних процесів у змішувальних системах може відбуватися в режимах різкого збільшення газотримувальної здатності або її зменшення в планових умовах.

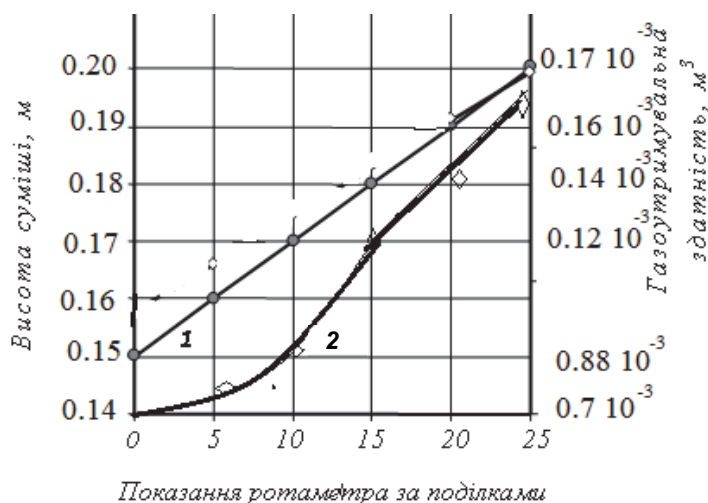
До числа перехідних процесів в умовах введення рідинного руху потоків відносяться ті, яким відповідає поява диспергованої газової фази в повному об'ємі середовища. Водночас на момент утворення і виходу газової фази із середовища рівень газотримувальної здатності є найбільшим із послідовним активним зменшенням та переходом до усталеного режиму. Пояснити такий перебіг процесів можливо утворенням на цей момент циркуляційних контурів у робочій камері і збільшенням за цей рахунок абсолютної швидкості газової фази.

Перехідному процесу також відповідає припинення інтенсивної дії робочого органа на утворення газової фази. Якщо воно здійснюється різким зменшенням потоку, то його результатом є масове спливання диспергованої газової фази.

Помічена різниця швидкостей спливання масивів повітря пояснюється фізичними властивостями газу і взаємодією його диспергованих масивів із рідиною. Очевидно, що на етапах спливання масивів має місце перебудова циркуляційних потоків у залишках газорідинної фази й одночасно всієї системи, яка представлена сукупністю рідинної й газорідинної фаз (рис. 3).

Таблиця 1. Результати визначення гідродинамічних параметрів системи з повітрям

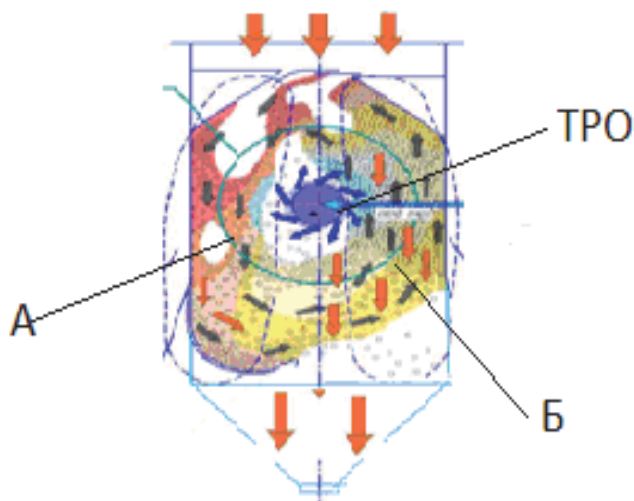
| Висота рідинної фази $h_{р.ф.} = 0,2$ м |          |          |          |          |          |          |
|-----------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Відлік показання ротаметра              | 0,0      | 10,0     | 15,0     | 18,0     | 20,0     | 27,0     |
| Висота суміші, м                        | 0,14     | 0,15     | 0,17     | 0,18     | 0,19     | 0,195    |
| Утримувальна здатність, м <sup>3</sup>  | 0,000708 | 0,000885 | 0,001239 | 0,001416 | 0,001593 | 0,001682 |



**Рис. 2. Залежність висоти суміші «рідина–повітря» (1) та її газоутримувальної здатності (2) від показів ротаметра за висоти рідинного шару 0,2 м**

У такій взаємодії відбувається переміщення рідинної фази, зменшується енергетичний потенціал. У зв'язку зі швидкоплинністю перебігу такого етапу відмітимо його порівняно малий вплив на техноло-

гічний процес і відсутність підведення зовнішнього енергетичного потоку, оскільки перебіг подій відбувається за рахунок потенціальної і кінетичної енергії системи на початок етапу.



**Рис. 3. Схема руху змішуваних компонентів в робочій камері: А- циркуляційний контур руху компонентів; Б- дія сил на компоненти; ТРО- тарільчастий робочий орган**

У зв'язку з останнім і частиною дослідів, яка стосувалася визначення газоутримувальної здатності прийшли до висновку про доцільність повної дестабілізації усталених режимів завдяки зміни режимів дії робочого органа в системі потоків.

При цьому треба врахувати, що складова роботи  $A_{гид}$  гідратації раніше не досліджувалась. Її величину приймали у відповідних параметрах. Тому у нашому випадку енергія, затрачена на гідратацію компонентів буде розглядатися системою рівнянь:

$$\begin{cases} \Delta U = A_{заг} + q \\ Q_{гид} = \frac{BC_T \Delta t_{гид}}{M} \end{cases} \quad (10)$$

де  $\Delta U$  – зміна внутрішньої енергії;  
 $Q_{гид}$  – кількість теплоти наданої за рахунок гідратації Дж;

$\Delta t_{гид}$  – приріст температури за рахунок гідратації;

$q$  – кількість теплоти наданої системі, Дж;

$A_{заг}$  – робота проведена системою, Дж;

$M$  – кількість борошна в опарі, кг;

$B$  – кількість оброблювальної опари, кг;

$C_T$  – питома теплоємність опари, кДж/кг.

Під час збивання суміші, де відсутня робота на пластифікацію, припускали:

$$A_{заг} = Q_{гид} \quad (11)$$

Враховуючи, що автор процесу змішування [9] вважає, що:

$$C_T = \frac{C_M M + W}{B} \quad (12)$$

де  $C_M$  – питома теплоємність борошна, кДж/кг;

$W$  – кількість води (замінники) по рецептурі опари, кг;

$M$  – кількість борошна, кг;

$B$  – кількість оброблювальної опари, кг.

$$\begin{aligned} A_{гид} &= \frac{BC_T \cdot \Delta t_{гид}}{M} \\ \text{Тоді: } A_{гид} &= \Delta U - g \end{aligned} \quad (13)$$

Зміна внутрішньої енергії :

$$\Delta U = \frac{(C_M M + W) \cdot \Delta t_{гид}}{M} \quad (14)$$

Розв'язок (10) :

$$A_{гид} = \frac{\Delta t}{M} (CM + B) \quad (15)$$

З аналізу вище викладеного про енергію, яка може в різних формах передаватися через робочий орган на середовище, взято загальні режими циклу енергетичних змін у зростанні швидкості спливання газового диспергованого масиву, тобто, складову стадійності змішування. Максимальне дроблення бульбашок газу в утворюючій суміші за рівномірного рівня дії поверхні тарільчастого робочого органу, сприяє виникненню тонкостинної дрібної рівномірної пористості виробів. Дроблення бульбашок газу є одним із основних факторів, що впливає на стійкість форми напівфабрикату. В подальшому вона трансформується в інші якісні показники. Водночас треба забезпечити мінімальні витрати енергії на створення однорідної суміші з досить рівномірним розподілом по всьому промішаному об'єму концентрації твердих компонентів (борошна) у рідкій фазі.

Досягнутий рівномірний стан суміші нестійкий. Аерація суміші сприяє збільшенню швидкості обмінних процесів, що в цілому відображається на її насиченні киснем. При цьому насичення суміші киснем призводить до інтенсивного процесу каталізу окислювання. Частина бульбашок має вигляд емульсії газу в рідкій фазі суміші, а інша - в набухлих білках суміші у ви-

гляді газових бульбашок. Збільшення поглинання об'єму води активізує дії ферментів, що в цілому визначає процеси набухання й пептизації білків і розрідження суміші.

З огляду на це проводили прогнозування зміни об'єму утворюючої системи при змішуванні у вигляді пористості (об'єму газової фази). Із рівняння енергетичного балансу знахо-

дили роботу затрачену на нагрівання структурних компонентів й взаємодіючого робочого органа з ними [1]:

$$A_3 = \frac{t_2 - t_1}{n\tau} (m_t c_t - m_m c_m) \quad (16)$$

Враховуючи закон Менделєєва-Клайперона для ідеального газу [8] й рівняння теорії [1] та визначеної гідротації, отримали:

$$\begin{cases} \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \\ A_{\text{зар}} = A_3 + A_{\text{гид}} = \frac{t_2 - t_1}{n\tau} (m_t c_t - m_m c_m) + \frac{\Delta t}{M} (C_6 M + B) \end{cases} \quad (17)$$

Припустивши, що  $T_2 = t_2 - t_1$ , проводили перетворення системи рівнянь й визначали об'єм газової фази  $V_2$ .

Додатковим впливом на систему є зміна гідродинамічних режимів у зв'язку з несталою динамікою утворення диспергованої газової фази. Поверхня газорідинного потоку визначається через сукупність фізико-хімічних властивостей середовища і швидкості обтікання поверхні робочого органа. Утворювані газорідинні контури частіше носять хаотичний характер, що також призводить до порушень теплової циркуляції. Водночас рівні таких порушень можуть бути достатньо глибокими зі змінами напрямків в контурах робочої камери.

Отже, гідродинамічні режими в робочій камері визначаються трьома причинами. Перша з них стосується утворених потоків поверхневих контурів під час взаємодії у зваженому стані дозуючої дріжджової суспензії та дозуючого борошна. Друга – це утворення потоків поверхневих контурів за обертів дії тарільчастого робочого органа. Третя причина стосується утворення потоків за участю газової фази та гравітаційної дії на потоки, які стрімко стікають стінками циліндричної робочої камери.

Очевидно, що кожна з названих причин характеризується своїми рушійними чинниками. Для першого і другого чинників є різниця руху середовища й температур. У третьому ж випадку рушійним чинником є присутність диспергованої газової фази і притому значення має швидкість утворення останньої, що у свою чергу залежить від швидкості збивання й утворення пінного каркасу. Певного рівня узагальнення в останньому випадку може бути представлено утримувальною здатністю середовища по газовій фазі. Газоутримувальна здатність середовища залежить від зміни висоти рідинної фази  $h_{\text{д.д.}}$  в робочій камері машини, інтенсивності аерації, часу перебігу перехідних процесів формування повного об'єму газорідинного середовища, часу перехідного процесу виходу диспергованої газової фази. Характеристики газу наведені у табл. 2.

Зміна  $\Delta h$  висоти набухлого газорідинного шару порівняно з висотою рідинного означала можливість визначення величини газоутримувальної здатності:

$$u_{\text{г.р.с.}} = \Delta h f. \quad (18)$$

де  $f$  – площа перерізу робочої камери.

Таблиця 2. Фізичні параметри повітря

| Газ     | Молекулярна маса | Питома маса, кг/м <sup>3</sup> | Газова стала, Дж/(кг×К) |
|---------|------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Повітря | 28,96            | 1,293                          | 287                     |

Відповідно об'єм набухлого газорідинного шару для кожної зони робочої камери, буде становити:

$$V = \pi \int_{h_1}^h y^2 dx \quad (19)$$

де  $y$  - радіус циліндричної камери, мм;  
 $x$  - висота камери, мм.

Із врахуванням того, що рівень центральної частини опари в середньому на 20...30 мм вищий, чим у стінок робочої камери та із врахуванням конічної її частин, то об'єм для утвореної суміші перед вивантаженням буде визначатися:

$$V_{\text{заг}} = \pi \int_{h_1}^h [y_1 + (x - h_1) \operatorname{tg} \alpha]^2 dx = \frac{\pi}{3 \operatorname{tg} \alpha} \{ [y_1 + (h - h_1) \operatorname{tg} \alpha]^3 \}. \quad (20)$$

Швидкість генерування газової фази визначена технологією процесу й у кожному поперечному перерізі циліндричної робочої камери машини можливо виявити ознаки диспергованої газової фази. Системою керування термодинамічних параметрів передбачено досягнення максимального тиску  $P_1 = P_{\text{max}}$ , і від моменту його досягнення передбачається зниження до певного значення  $P_2$ . При цьому:  $\Delta P = P_1 - P_2$ .

Важливо, що зміна тиску  $\Delta P$  від координати обраної точки в робочій камері не залежить. Об'єм утвореного середовища залежить від величини утримувальної здатності та від розташування відповідних його прошарків. Очевидно, що утворена фаза є у формі масивів диспергованих бульбашок, загальний об'єм яких обчислюється з використання рівняння Менделєєва-Клапейрона:

$$V_{\text{пит.}} = \frac{m_{O_2}}{P_{(k)}} RT. \quad (21)$$

Питома маса  $O_2$  є відомою (табл. 2) і відомим є кінцевий тиск  $P_{(k)}$ , який відповідає обраній координаті  $h$ , тоді:

$$P_{(k)} = P_0 + mgh. \quad (22)$$

Тому питомий об'єм утвореної збивальної маси згідно з рецептурою

з відповідним насиченням повітря, буде становити:

$$V_{\text{пит.}} = \frac{m_{O_2}}{P_0 + mgh} RT, \quad (23)$$

де  $R$  і  $T$  – відповідно універсальна газова фаза й абсолютна температура середовища.

Вказане генерування диспергованої газової фази означає присутність енергетичних витрат на утворення міжфазної поверхні, що повинно враховуватися в загальному енергетичному балансі. Одночасно з цим треба назвати ще одну особливість. Частина газової фази, що існувала і продовжує існувати в новому режимі після змішування, потрапляє в режим перехідного процесу. Існування є неминучим, оскільки на нову зароджену в середовищі бульбашку миттєво діє Архімедова сила незалежно від того, в якому стані перебуває рідина фаза. У зв'язку з цим починається відносне переміщення газової фази зі зростаючою швидкістю до значення, за якого сила опору середовища стане рівною Архімедовій силі. Тому з утворенням середовищем необхідно упродовж певного періоду (10...20с.) провести технологічну операцію – вивантаження напівфабрикату.

## **Висновки і перспективи.**

Найбільше змінюється об'єм суміші під кінець стадії змішування за максимальної маси (згідно рецептури), тобто в утвореній суміші та відсотковому складі газової фази 13,6 %. Тому найефективніше змішуються порошкоподібні тверді речовини й рідини на поверхні контакту фаз, при цьому необхідно дотримуватися зміщеного режиму дозування компонентів у зваженому стані та механічного впливу робочого органу. З огляду на поставлені завдання і умови проведення змішування опари, визначені вимоги до конструкції змішувача, водночас встановлено, що подача компонентів має тривати не менше 45с. За цей період відбувається гідратація та зменшення споживання енергоресурсів.

---

## **Список використаних джерел**

1. Chernenkova, A., Leonova, S., Chernykh, V., Chernenkov, E. Influence of biologically active raw materials on rheological properties of flour confectionery products. *Acta Biologica Szegediensis*. 2019. vol. 63. p. 195-205.
2. Stadnyk, I., Sokolenko, A., Piddubnyy, V., Vasylykivsky, K., Chahaida, A., Fedoriv, V. Justification of thermodynamic efficiency of the new air heat pump in the system of redistribution of energy resources at the enterprise. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2021a. vol. 15, p. 680-693.
3. Stadnyk, I., Piddubnyi, V., Beyko, L., Dobrotvor, I., Sabadosh, G., Hushtan, T. Formation of heat and mass transfer bonds when mixing components in a suspended state. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2021b. vol. 15, p. 810-823.
4. Danyliuk, O., Atamanyuk, V., Gumnytsky, Y., Bachyk, M. Investigation of the regularities of the process of periodic dissolution of polydisperse benzoic acid particles during pneumatic mixing. Integrated technologies and energy saving. 2017. p. 36-40.
5. Lisovska, T., Stadnik, I., Piddubnyi, V., Chorna, N. Effect of extruded corn flour on the stabilization of biscuit dough for the production of gluten-free biscuit. *Ukrainian Food Journal*. 2020. vol. 9, no. 1, p. 159-175.
6. Stadnyk, I., Pankiv, J., Havrylko, R., Karpyk, H. Researching of the concentration distribution of soluble layers when mixed in the weight condition. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2019. vol. 13, no. 1, p. 581-592.
7. Nakov, G., Ivanova, N. The effect of different methods for production of crackers on their physical and sensory characteristics. *Technologica Acta-Scientific professional journal of chemistry and technology*. 2020. vol. 13 no. 1. p. 41-45.
8. Kolyanovska, L., Palamarchuk, I., Sukhenko, Y., Mussabekova, A., Bissarinov, B., Popiel, P., Mushtruk, M., Sukhenko, V., Vasuliev, V., Semko, T., Tyshchenko, L. Mathematical modeling of the extraction process of oil-containing raw materials with pulsed intensification of heat of mass transfer. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2019. 25 p.
9. Mushtruk, M., Gudzenko, M., Palamarchuk, I., Vasylyv, V., Slobodyanyuk, N., Kuts, A., Nychyk, O., Salavor, O., Bober, A. Mathematical modeling of the oil extrusion process with pre-grinding of raw materials in a twin-screw extruder. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2020. vol. 14, p. 937-944.
10. Palamarchuk, I., Mushtruk, M., Sukhenko, V., Dudchenko, V., Korets, L., Litvinenko, A., Deviatko, O., Ulianko, S., Slobodyanyuk, N. 2020. Modelling of the process of vibromechanical activation of plant raw material hydrolysis for pectin extraction. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. vol. 14. p. 239-246.
11. Sukhenko, Y., Mushtruk, M., Vasylyv, V., Sukhenko, V., Dudchenko, V. Production of Pumpkin Pectin Paste. In Ivanov, V., Trojanowska, J., Machado, J., Liaposhchenko,

- O., Zajac, J., Pavlenko, I., Edl, M., Perakovic, D. Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. Proceedings of the 2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2019, Juna 11-14, 2019, Lutsk, Ukraine. Switzerland : Springer International Publishing, p. 805-812.
12. Osipenko, E., Denisovich, Y., Gavrilo, G., Vodolagina, E. The use of bioactive components of plant raw materials from the far eastern region for flour confectionery production. AIMS Agriculture and Food. 2019. vol. 4(1). 73-87.
13. Savenkova, T., Soldatova, E., Misteneva, S., Taleysnik, M. Technological properties of flour and their effect on quality indicators of sugar cookies. Food systems. 2019. vol. 2(2). 13-19.
14. Shishkin, A., Sadygova, M., Belova, M., Kirillova, T. Mathematical model of resource-saving production technology of baked goods with amaranth flour. Journal of Engineering Studies and Research. 2020. vol. 26(3). p. 195-203.
15. Pyvovarov, P., Cheremskaya, T., Kolesnikova, M., Iurchenko, S., Andrieieva, S. Study of properties of wheat germ and meals and their use in the production of dietary hardtacks. Science Rise. 2021. vol. 4. p. 39-47.
- suspended state. Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences. 15. 810–823.
4. Danyliuk, O., Atamanyuk, V., Gumnytsky, Y., Bachyk, M. (2017). Investigation of the regularities of the process of periodic dissolution of polydisperse benzoic acid particles during pneumatic mixing. Integrated technologies and energy saving. 36-40.
5. Lisovska, T., Stadnyk, I., Piddubnyi, V., Chorna, N. (2020). Effect of extruded corn flour on the stabilization of biscuit dough for the production of gluten-free biscuit. Ukrainian Food Journal. 9(1). 159-175.
6. Stadnyk, I., Pankiv, J., Havrylo, R., Karpyk, H. 2019. Researching of the concentration distribution of soluble layers when mixed in the weight condition. Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences. 13(1). 581-592.
7. Nakov, G., Ivanova, N. (2020). The effect of different methods for production of crackers on their physical and sensory characteristics. Technologica Acta-Scientific professional journal of chemistry and technology. 13(1). 41-45.
8. Kolyanovska, L., Palamarchuk, I., Sukhenko, Y., et al. (2019). Mathematical modeling of the extraction process of oil-containing raw materials with pulsed intensification of heat of mass transfer. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 25 p.
9. Mushtruk, M., Gudzenko, M., Palamarchuk, I., et al. (2020). Mathematical modeling of the oil extrusion process with pre-grinding of raw materials in a twin-screw extruder. Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences. 14. 937-944.
10. Palamarchuk, I., Mushtruk, M., Sukhenko, V., et al. (2020). Modelling of the process of vibromechanical activation of plant raw material hydrolysis for pectin extraction. Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences. 14. 239-246.
11. Sukhenko, Y., Mushtruk, M., Vasylyv, V., et al. (2019). Production of Pumpkin Pectin Paste. In Ivanov, V., Trojanowska, J., Machado, J., Liaposhchenko, O., Zajac, J., Pavlenko, I., Edl, M., Perakovic, D. Advances in Design,
- 

### References

1. Chernenkova, A., Leonova, S., Chernykh, V., Chernenkov, E. (2019). Influence of biologically active raw materials on rheological properties of flour confectionery products. Acta Biologica Szegediensis. 63(2). 195-205.
2. Stadnyk, I., Sokolenko, A., Piddubny, V., et al. (2021). Justification of thermodynamic efficiency of the new air heat pump in the system of redistribution of energy resources at the enterprise. Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences. 15. 680–693.
3. Stadnyk, I., Piddubnyi, V., Beyko, L., et al. (2021). Formation of heat and mass transfer bonds when mixing components in a

- Simulation and Manufacturing II. Proceedings of the 2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2019, June 11-14, 2019, Lutsk, Ukraine. Switzerland : Springer International Publishing, 805-812.
12. Osipenko, E. Y., Denisovich, Y. Y., Gavrilova, G. A., Vodolagina, E. Y. (2019). The use of bioactive components of plant raw materials from the far eastern region for flour confectionery production. *AIMS Agriculture and Food*. 4(1). 73-87.
13. Savenkova, T. V., Soldatova, E. A., Misteneva, S. Y., Taleysnik, M. A. (2019). Technological properties of flour and their effect on quality indicators of sugar cookies. *Food systems*. 2(2). 13-19.
14. Shishkin, A., Sadygova, M., Belova, M., Kirillova, T. (2020). Mathematical model of resource-saving production technology of baked goods with amaranth flour. *Journal of Engineering Studies and Research*. 26(3). 195-203.
15. Pyvovarov, P., Cheremskaya, T., Kolesnikova, M., Iurchenko, S., Andrieieva, S. (2021). Study of properties of wheat germins and meals and their use in the production of dietary hardtacks. *Science Rise*. 4. 39-47.

---

**I. Ya. Stadnyk, V. V. Sarana, M. M. Mushtruk, V. P. Vasyliv, M. M. Zheplinska, I. P. Palamarchuk, Z. A. Burova, M. M. Gudzenko (2021). DYNAMICS OF INTERPHASE INTERACTION BETWEEN COMPONENTS DURING MIXING. ANIMAL SCIENCE AND FOOD TECHNOLOGY, 12(2): 60-72. <https://doi.org/10.31548/animal2021.02.007>**

**Abstract.** The processes of mixing, whipping, and foaming are essentially uniform and consist in dispersing the gas in a liquid. When mixing and whipping, the mixture of components is swollen due to the mechanical action; increased in volume water-insoluble protein substances (gluten proteins) form a three-dimensional spongy mesh continuous structure. It is called a gluten frame. It determines the elastic and resilient properties of the medium.

Therefore, the purpose of the study is to establish the relationship between the gas holding capacity of the medium and the energy expended on the hydration of the components. The study solves the task of determining the gas holding capacity of the medium with variable parameters of the height of the liquid phase from the mixing intensity, the duration of transient processes for the formation of the full volume of the gas-liquid medium, the duration of the transient process for the dispersed gas phase yield. The difference between the levels before the gas phase formation and during the mixing (aeration) mode determines the value of the gas holding capacity. In this context, we concluded that it is expedient to completely destabilize the established modes by changing the operating modes in the working body in the flow system. An additional effect on the system is the change of hydrodynamic regimes due to the unstable dynamics of the dispersed gas phase formation. The generation of the dispersed gas phase means the presence of energy expenditure on the interphase layer formation, which should be considered in the total energy balance. At the same time, another feature should be mentioned. Part of the gas phase, which existed and continues to exist in the new mode after mixing, enters the mode of a transient process.

Therefore, the most effective mixing occurs while adhering to the shifted mode for dosing components in a suspended state and the mechanical impact of the working body. Based on the given objectives and conditions of sponge dough mixing, we determined the requirements for the mixer design and found that the supply of components should last at least 45 seconds. During this period, hydration occurs and energy consumption is declining.

**Keywords:** mixing, solid, liquid and gas phase, concentration changes, thermodynamics, hydration, sponge dough