

Як видно з рисунку 1, в інтервалі вологості повітря зовнішнього середовища, що взято в експерименті, дрібнодисперсний порошок з м'яса поглинає вологу 0,6...0,7 Па/Па, у ньому встановлюється відносна рівновага; у діапазоні 0,6...0,9 Па/Па на кривій спостерігається різкий стрибок в бік збільшення масової частки вологи у зразку порошку з м'яса. За результатами дослідження можна зробити висновок, що порошок з капусти необхідно зберігати за вологості повітря 60...70%.

Мікробіологічні показники якості сушеного м'яса та порошоків з нього після 12 міс. зберігання наведено в таблиці 3.

Дані таблиці 3 свідчать про відповідність мікробіологічних показників небезпечності вимогам регламентів протягом встановлених термінів зберігання в поліетиленовому і вакуумному пакуванні.

Висновки. На підставі проведених багатопланових комплексних досліджень обґрунтовано термін зберігання сушеного м'яса та порошоків з м'яса: в поліетиленовому пакуванні не більше 6 міс., у вакуумному – не більше 12 міс. за температури $(18\pm 3)^\circ\text{C}$ та відносної вологості повітря зовнішнього середовища 60...70%.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямку. У подальшому сушене м'ясо та порошки з нього планується залучати для створення технологічних потоків виробництва широкого асортименту кулінарної продукції в умовах закладів ресторанного господарства, особливо на підприємствах швидкого обслуговування.

Список літератури

1. М'ясний фарш «Особливий». Харчові концентрати. Технічні умови: ТУ 18-28-38-2007. – [Чинні від 2007-01-21]. – Луганськ, 2007. – 17 с.
2. The influence of physio acid and ascorbic in formulas on soy isolate / L. Davidson [et al.] // Pediatrics Res. – 1994. – 39. – 3 – P. 437-445.
3. Погожих Н.И. Научные основы теории и техники сушки пищевого сырья в массообменных модулях: дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12 / Н.И. Погожих. – Х., 2002. – 365 с.

УДК 637.134

Самойчук К.О., канд. техн. наук, доц., Ковальов О.О. (ТДАТУ, Мелітополь)

МЕХАНІЗМ РУЙНУВАННЯ ЖИРОВИХ КУЛЬОК У СТРУМИННОМУ ГОМОГЕНІЗАТОРІ З РОЗДІЛЬНИМ ПОДАВАННЯМ ВЕРШКІВ

У статті наведено аналіз механізмів руйнування жирових кульок у процесі струменевої гомогенізації з роздільним подаванням вершків і визначено вирішальні сили, що діють на кульку.

Ключові слова: механізм, руйнування, струменева гомогенізація, жирова кулька, теорія.

Постановка проблеми та її зв'язок із найважливішими науковими та практичними завданнями. Незважаючи на достатню увагу, що приділяється питанню зниження енергоємності процесу гомогенізації, проблема й досі є актуальною. У зв'язку із цим інтерес має дослідження струменевого гомогенізатора. У ньому, завдяки створенню максимальної різниці швидкостей між жировою кулькою та дисперсійною фазою, що оточує, можливе досягнення високої ефективності процесу та поєднання в установці гомогенізації та нормалізації за умови дозування вершків [1].

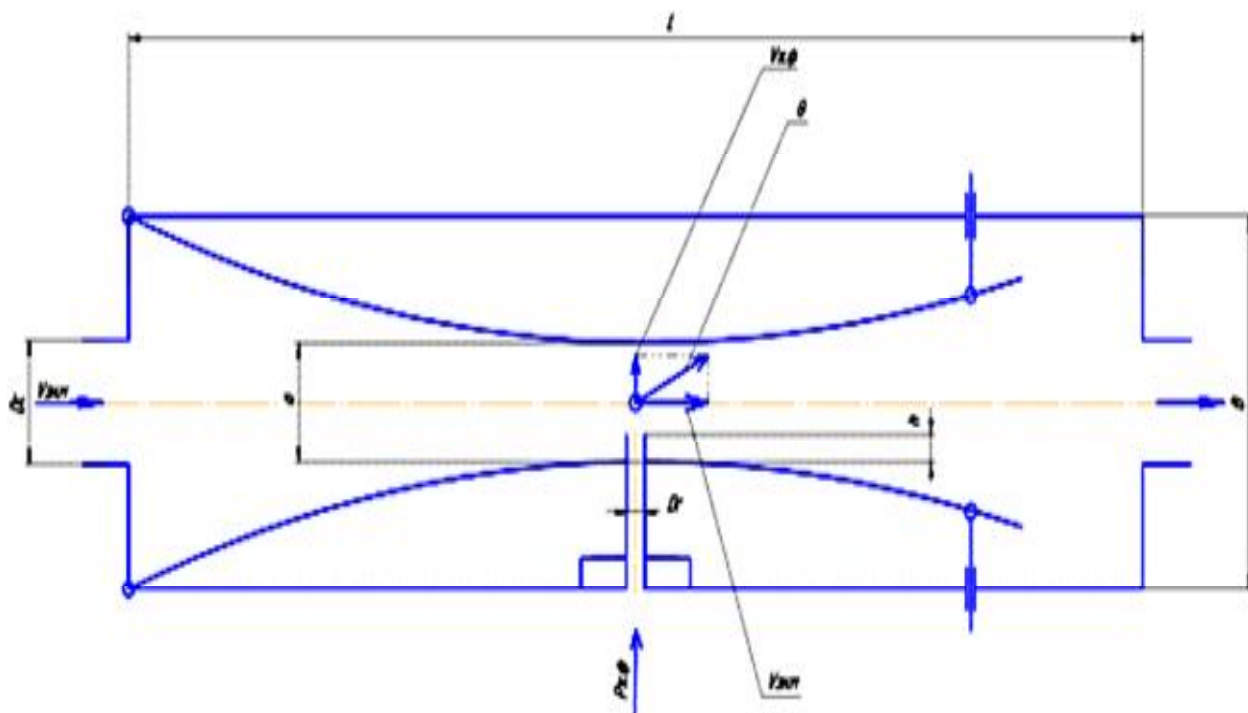
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оскільки досі не є вирішеною проблема формулювання єдиної теорії подрібнення жирових кульок у процесі гомогенізації, існує низка теорій, кожна з яких суперечать одна одній. До гіпотез гомогенізації належать [2]:

- руйнування під впливом дії повздовжнього градієнта швидкості потоку при вході у клапанну щілину;
- руйнування під впливом поперечного градієнту швидкості потоку у клапанній щілині;
- руйнування за рахунок відцентрової сили за обертального руху жирової кульки у градієнтному полі швидкостей;
- руйнування здуванням мікрочасток із поверхні жирової кульки;
- гіпотеза субкавітаційної гомогенізації.

Постановка завдання. Для розроблення математичної моделі процесу гомогенізації молока в струминному гомогенізаторі з роздільним подаванням жирової фази необхідно визначити механізми подрібнення і рушійні сили цього процесу.

Виклад основного матеріалу досліджень. Потік струминного гомогенізатора (рисунок 1) розглядається як затоплений турбулентний струмінь. У затопленому струмені розвивається турбулентність: ламінарна приосьова частина струменя звужується та зникає на відстані шести діаметрів отвору, а турбулентний струмінь розширюється за рахунок вихорів. Структура турбулентного потоку така, що близько до стінок, де рух часток рідини обмежений та існують малі осереднені швидкості, зберігається ламінарний характер руху часток. Товщина цього шару зменшується зі збільшенням числа Re . Збудження руху часток, що виникає, за турбулентного режиму, додаткове до основного, підтримує прояв інерції рідини та нівелюється силами в'язкості. Збільшення швидкості руху знежиреного молока сприяє збереженню і розвитку збудженого руху рідини. Для турбулентного потоку є характерним наступне: гальмувальна дія стінок трубки створює нерухому плівку, усередині якої рухається рідина. Ця плівка розповсюджує свій вплив далі, усередину потоку на деяку глибину, створюючи шар, в якому, за дослідженнями Прандтля, рідина рухається ламінарно. У ньому швидкість зростає від нуля біля стінок, а інша частина потоку рухається у внутрішньому кільці турбулентно [3].

Струмінь є нестійким і на деякій відстані від зрізу сопла розпадається на краплі. У процесі подавання рідини під тиском на неї можуть діяти капілярні сили, турбулентні пульсації, зовнішні інерційні сили, причому визначальною може стати будь-яка з них.



1 – L – довжина камери гомогенізатора; 2 – $V_{ж.ф}$ – швидкість жирової фази; 3 – Θ – тангенційні напруження; 4 – $V_{зн.м}$ – швидкість знежиреного молока; 5 – D_c – діаметр сопла камери гомогенізатора; 6 – $P_{ж.ф}$ – подавання жирової фази; 7 – D_r – діаметр голки; 8 – a – відстань між напрямними; 9 – h – висота камери; 10 – B – ширина камери.

Рисунок 1 – Схема камери струминного гомогенізатора

За великих швидкостей витікання роль зовнішніх інерційних сил буде істотною. Якщо суцільне середовище має більшу щільність, то дисперсну фазу подають із дна резервуара. Фаза, що диспергується, під дією архимедової сили підіймається та потрапляє до зони інтенсивного перемішування, де під впливом потоку подрібнюються на дрібні краплі. У нашому випадку дія архимедової сили буде незначною, оскільки створені інтенсивні турбулентні пульсації потоку будуть подрібнювати жирову фазу раніше [4].

Процес подрібнення жирових кульок відбувається в три етапи: на першому відбувається первинне диспергування жирової фази за рахунок різниці поверхневих натягів рідин; на другому – подрібнені жирові кульки потрапляють до інтенсивного турбулентного потоку крапель, що хаотично пульсує, відривається від струмини у місці найбільшого звуження полідисперсного факела, в якому відбувається головне подрібнення за рахунок різниці в швидкостях потоків. На третьому етапі відбувається подрібнення за рахунок мікропульсацій рідини. У процесі зниження поверхневого натягу, що буде відбуватись зі збільшенням температури, довжина струменя буде збільшуватись, що за інших рівних умов буде сприяти кращому подрібненню [5].

Розглянемо кожен з етапів подрібнення. Зміна гідродинамічних параметрів значною мірою визначає протікання тепломасообмінних процесів між краплею та рідиною. Критерій Рейнольдса визначає співвідношення сил інерції та

в'язкості в однорідному потоці. Під час руху потоку в ньому виникають збудження, що беруть початок від стінок каналу, або вносяться до потоку ззовні. Вплив збудження залежить від співвідношення сил інерції та в'язкості. Якщо переважають сили інерції – збудження розвивається, потік впливає на течію, змінюється його структура. Межа співвідношення визначається за значенням $Re_{кр}$. Якщо $Re < Re_{кр}$, переважають в'язкі сили; якщо $Re > Re_{кр}$ – сили інерції [5].

Для труби будь-якого перетину та ступеня заповнення рідиною:

$$Re = \frac{V_{зн.м} \cdot D_c}{\nu}, \quad (1)$$

де $V_{зн.м}$ – швидкість струменя знежиреного молока;

D_c – діаметр сопла подавання дисперсійної фази камери гомогенізатора.

$$V_{зн.м} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{зн.м}}}, \quad (2)$$

Знежирене молоко, що витікає із циліндричного сопла, буде розпилюватись комбінацією гідравлічного та пульсаційного розпилювання, відмінною особливістю якого є накладення пульсацій тиску або витрат на потік рідини. Коливання рідинної плівки, що виникають при цьому, сприяють збільшенню поверхневої енергії, втраті стійкості потоку та, як наслідок, більш тонкому диспергуванню. Розрахунки, що проводились за низкою експериментів у широкому діапазоні чисел Лапласа та за граничних значень критерію Вебера, свідчать, що критичне число $Re_{кр}$ для всіх випадків відповідає режиму обтікання сфери з руйнуванням шару за миделевим перетином.

$$We_{кр} = \frac{V_{ж.ф}^2 d_k \rho}{2\sigma}, \quad (3)$$

де ρ – густина плазми;

$V_{ж.ф}$ – швидкість руху краплі;

σ – міжфазний натяг;

d_k – діаметр краплі.

При впливі на двофазне середовище потужних імпульсів тиску та швидкості може відбутись вибухове подрібнення, коли розпадання за всім об'ємом відбувається так швидко, що зрив поверхневого шару майже не помітний. Процес вибухового подрібнення розглянуто в праці [5]. Там же надано вдалу класифікацію режимів подрібнення за спектром крапель.

1. Перший режим має місце при $4 \leq We_{кр} \leq 20$ та $0,1 \leq WeRe^{-0,5} \leq 0,8$ поєднує звичайний поділ на 2-4 краплі, руйнування «сумки» та хаотичне подрібнення, за якого розмір вторинних крапель наближується до розміру основних. За подрібнення крапель в умовах зростання відносних швидкостей для рідин невеликої в'язкості відбувається видування в «сумку», при цьому значно зменшу-

ється коефіцієнт опору і таким чином компенсується вплив динамічного напору, що зростає.

2. Другий режим має межі $10 \leq We_{кр} \leq 10^2$ та $0,5 \leq WeRe^{-0,5} \leq 10$, при цьому відбувається подрібнення зі зривом поверхневого шару, що дає дуже дрібне розпилювання, одночасно з великими вторинними частками, що відділяються від головної краплі.

3. Третьюму режиму подрібнення відповідає $10^3 \leq We_{кр} \leq 10^5$ та $10 \leq WeRe^{-0,5} \leq 10^2$ відповідає вибуховому характеру розпаду, за якого розміри основної маси крапель значно менші за вихідну [5].

При $We > 50$ зіткнення крапель супроводжуються роздуванням краплі – мішені в декілька разів, причому, зберігаючи сферичну форму на поверхні, з'являється хвилеподібне збудження. Потім з'являється вибухове подрібнення, коли велика кількість вторинних крапель радіально розлітаються із зони взаємодії. За умови істотного перевищення швидкості рідини критичного значення подрібнення відбувається шляхом зриву навітряного поверхневого шару рідини з краплі, що має форму диска, диск перфорується та краплі розпадаються на декілька дрібних [5].

А.Н. Колмогоров, аналізуючи рух крапель в турбулентному потоці, припустив, що подрібнення відбувається внаслідок їх деформації під дією різниці динамічних напорів знежиреного молока, що перевищують сили міжфазного натягу [6]:

$$\frac{C_{рзн.м} \Delta U d^2}{2} \geq \frac{4 \delta_{зн.м}}{dh}, \quad (4)$$

де C – коефіцієнт пропорційності, наближений до одиниці;

ΔU – різниця швидкостей суцільного середовища, що діють на відстані d_k ;

$\rho_{зн.м}$ – густина знежиреного молока;

$\sigma_{зн.м}$ – поверхневий натяг знежиреного молока.

Вищенаведене рівняння описує умови подрібнення краплі у процесі впливу на неї динамічних напорів, сталих у часі, у пристінних шарах рідини. Об'єм пристінних шарів є невеликим, тому головна маса крапель подрібнюється в турбулентному ядрі потоку [6].

Механізм подрібнення крапель під впливом турбулентних пульсацій, звичайно, розглядають, виходячи з теорії локальної ізотропної турбулентності, розробленої А.Н. Колмогоровим та А.М. Обуховим [6]. Сутність її в наступному: за великих значень Re на потік рідини, що рухається з деякою середньою швидкістю, у каналі накладаються турбулентні пульсації першого порядку, що являють собою хаотичні переміщення одне відносно одного окремих об'ємів рідини з масштабом $\lambda_1 \leq l$, за швидкості цих переміщень $u_1 \approx V_{зн.м}$ [7].

Унаслідок нестійких пульсацій першого порядку на них накладаються пульсації другого порядку, менший масштаб і менші пульсаційні швидкості $u_2 < u_1$. Процес послідовного подрібнення пульсацій відбувається до моменту, коли для пульсацій деякого порядку і число $Re_i = \lambda_0 u_i / \nu$ не буде достатньо ма-

лим, щоб відчутний вплив в'язкості рідини попереджав утворення пульсацій $i+1$ порядку.

Картина подрібнення, згідно з теорією локальної ізотропної турбулентності, буде наступною. Якщо крапля має деякий діаметр d_k , то на неї можуть результативно впливати тільки пульсації з масштабом $\lambda = d_k$. Деформація та руйнування краплі відбувається за рахунок кінетичної енергії суцільного середовища $E = \rho_{зн.м} \Delta u_d^2 / 2$, обумовлено різницею пульсаційних швидкостей Δu_d , що діють на відстані d_k . Пульсації великого масштабу ($\lambda > d_k$), унаслідок малої різниці швидкостей на відстані d_k , не можуть бути причиною її деформації. Також на краплю не можуть впливати пульсації з масштабами $\lambda < d_k$ [7].

Згідно з теорією гідродинамічного граничного шару, достатньо великі значення дотичних напружень та сил внутрішнього тертя можуть виникнути лише за наявності достатньо великих градієнтів швидкості:

$$\tau = \mu \frac{dw}{dy}, \quad (5)$$

Утворення вільного струменя обумовлено тим, що в потоці під дією поперечних турбулентних пульсацій невеликі об'єми рідини викидаються за початкову межу потоку. Зтикаючись зі струменем, що оточує, спокійною рідиною, ці об'єми призводять її до руху, а їхня швидкість зменшується. На місце вибулих часток до струменя надходять нові з середовища, що оточує, та підгальмовують частки, що рухаються швидше.

Прандтль для оцінки ступеня турбулізації пропонує термін «шлях змішування», що полягає в проходженні елементарних часток рідини в вихорі за турбулентної течії і проникнення з рухомого шару в рідину, що оточує, доки їх швидкості не зрівняються. Шлях змішування буде тим більше, чим інтенсивніше турбулентність. У середині потоку, де швидкість та турбулізація потоку є найбільшими, шлях змішування Прандтля буде мати найбільше значення. Шлях змішування зі зростанням турбулентності є значно більшими, тому тангенційні напруження та масообмін у потоці істотно зростає [4].

$$\Theta = \rho L p^2 \left(\frac{dw}{dy} \right)^2, \quad (6)$$

де Θ – тангенційні напруження;

$\frac{dw}{dy}$ – градієнт швидкості в цій частині потоку.

Різниця швидкостей руху диспергованих крапель та рідини, що оточує, обумовлюють появу тангенційних напружень, що викликає деформацію крапель, що матиме значення достатньо високе для початку подрібнення. Проти деформації крапель під дією тангенційних напружень діє міжфазний натяг, що змушує краплю, гранично скоротивши поверхню, прийняти форму шару. Вза-

ємодія цих сил обумовлює форму краплі та можливість її подрібнення. Найбільш інтенсивне подрібнення крапель відбувається в місці найбільшої різниці в швидкостях руху обох фаз [4].

Відношення між тангенційними напруженнями та градієнтом швидкості виражати тільки коефіцієнтом внутрішнього тертя η неможливо, необхідно ввести коефіцієнт турбулентного тертя ϵ , однак за умови розвиненої турбулентності ламінарним тертям можна знехтувати, тоді:

$$\Theta = \epsilon \frac{dw}{dy}, \quad (7)$$

Хінце для визначення подрібнення крапель пропонує відносне число Вебера та виразити його як відношення тангенційної напруги до міжфазного натягу [8]:

$$We_{кр} = \frac{\theta d_k}{\sigma}, \quad (8)$$

де θ – тангенційні напруження між краплею та рідиною, що оточує, що є пропорційним ступеню турбулізації потоку.

Збільшення критерію Вебера показує, що тангенційні стосовно міжфазного натягу зростає внаслідок збільшення деформації крапель. За досягнення критичних значень числа Вебера відбувається подрібнення крапель. З іншого боку, зростання числа Вебера призводить до зменшення середнього розміру жирових кульок та, як наслідок, підвищення колоїдної стійкості емульсій, що отримали, що відображається на якості продукту.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Розглянувши процеси, що відбуваються в струменевому гомогенізаторі з роздільним подаванням вершків, можна дійти висновку, що кулька в ньому подрібнюється в декілька етапів. Відмінність в швидкостях знежиреного молока та жирової кульки, що досягається зміною гідродинамічних параметрів, зв'язок яких із тангенційними напруженнями наведено у формулі (8), призводить до виникнення тангенційних напружень, які будуть визначальними в процесі руйнування жирової фази. До другорядних сил відносять: різницю в'язкостей, осциляцію, вторинні турбулентні пульсації, кавітацію.

У подальшому планується побудувати математичну модель подрібнення жирової фази у струминному гомогенізаторі з роздільним подаванням жирової фази.

Список літератури

1. Самойчук К.О. Розробка лабораторного зразка струминного гомогенізатору з роздільною подачею вершків / К.О. Самойчук, О.О. Ковальов // Праці ТДАТУ – 2011. – С. 77-84.

2. Самойчук К.О. Обґрунтування параметрів та режимів роботи протитечійно-струменевого диспергатора молока: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / К.О. Самойчук. – Донецьк, 2008. – 155 с.
3. Брайнес Я.М. Процессы и аппараты химических производств / Я.М. Брайнес. – М.: Госхимиздат, 1947. – 597 с.
4. Штербачек З. Перемешивание в химической промышленности: [пер. с чеш.] / З. Штербачек, П. Тауск. – Ленинград: Гос. науч.-техн. изд-во хим. лит., 1963. – 417 с.
5. Пажи Д.Г Основы техники распыливания жидкости / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. – М.: Химия, 1984. – 256 с.
6. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович. – М.: Эколит, 2011. – 728 с.
7. Соколов В.Н. Аппаратура микробиологической промышленности / В.Н. Соколов, М.А. Яблоков. – Ленинград: Машиностроение, 1988. – 278 с.
8. Hinze J. Am Inst / J. Hinze // Chem Eng. J. – 1955. – P. 289-295.

УДК 637.134

Самойчук К.О., канд. техн. наук, доц., Івженко А.О. (ТДАТУ, Мелітополь)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСПЕРГУВАННЯ ЖИРОВОЇ ЕМУЛЬСІЇ В ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ З ВІБРУЮЧИМ РОТОРОМ

У статті подано результати експериментальних досліджень енерговитрат та якості диспергування жирової емульсії в пульсаційному апараті з вібруючим ротором.

Ключові слова: диспергування, роторно-пульсаційний апарат, вібрація, коливання, дослідження, експеримент.

Постановка проблеми і її зв'язок із найважливішими науковими та практичними завданнями. Інтенсифікація технологічних процесів є одним із найважливіших завдань науки і техніки. Основою збільшення продуктивності устаткування і зниження енерговитрат на проведення технологічних процесів є створення й упровадження ефективних технологічних апаратів із малою питомою енергоємністю і матеріаломісткістю, високим ступенем впливу на речовини, що оброблюються. Для досягнення цих цілей розробляється і виготовляється нове вискоефективне устаткування, застосовуються різні фізико-хімічні ефекти та явища на основі науково-технічного прогресу і нових технологічних підходів.

Нині ширшого поширення набувають способи диспергування емульсивних систем у роторно-пульсаційних апаратах (РПА) різної модифікації. У РПА дія на потік середовища, що оброблюється, забезпечується примусовим перекриттям каналів його течії в системі ротор, що обертається, – нерухомих статор. При цьому в потоці виникають завихрення, удари, кавітація, що створюють іс-