

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ВОРОЩУК ВІКТОР ЯРОСЛАВОВИЧ

УДК 637.024

**ГІДРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ОБРОБКИ СИРКОВИХ МАС В
РОТОРНО-ВИХРОВОМУ ЕМУЛЬСОРІ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ - 2010

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Шинкарик Марія Миколаївна, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України, м. Тернопіль, доцент кафедри обладнання харчових технологій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Шурчкова Юлія Олександрівна, Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ, головний науковий співробітник

кандидат технічних наук
Орлюк Юрій Тимофійович, Технологічний інститут молока і м'яса Національної академії аграрних наук України, м. Київ, заступник директора з науково-інноваційної роботи

Захист відбудеться 20 жовтня 2010 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.058.02 Національного університету харчових технологій за адресою: 01033, м.Київ, вул. Володимирська, 58, аудиторія А-305.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01033, м.Київ, вул. Володимирська, 58.

Автореферат розісланий 16 вересня 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., доцент

Л.О.Кривопляс-Володіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Виробництво сиркових мас в Україні одержало розвиток у двох напрямках, які визначаються способом одержання білкового згустку: шляхом сепарування та традиційним способом одержання сиру кисломолочного. За традиційним способом у сир кисломолочний вносять відповідні компоненти і піддають його термічній та механічній обробці. Такий спосіб має переваги, оскільки більшість молочних підприємств орієнтовані на традиційну технологію виготовлення сиру кисломолочного, а для виробництва сиркових мас необхідно додатково встановити апарати, які б забезпечували перемішування, диспергування і термічну обробку.

Серед розроблених рецептур сиркових мас на базі сиру кисломолочного важливе місце займають суміші із структуроутворюючими речовинами (желатин, пектин, крохмаль тощо). Використання структуроутворюючих речовин дозволяє покращити органолептичні показники продукту, зробити його привабливим для споживача.

Підвищити якість продукту можна шляхом скорочення тривалості його обробки, що досягається за рахунок сумісної термомеханічної обробки. Такий метод використовується в апаратах типу “Штефан” і в роторно-вихрових емульсорах (РВЕ). Перевагою РВЕ є циркуляція продукту по замкнутому контуру, що забезпечує рівномірність його механічної і теплової обробки. Такі апарати знайшли широке застосування у виробництві в’язких продуктів – кетчупів, майонезів тощо. Проте їх впровадження в технологічні лінії виробництва композиційних продуктів на основі сиру кисломолочного обмежується недостатнім вивченням гідродинамічних та інших супутніх процесів. Очевидно, що такі гідродинамічні процеси, як подрібнення твердої фракції і перемішування, а також рівномірність теплової і механічної обробки визначаються як конструкцією самого апарату, так і реологічними характеристиками оброблюваного продукту. А. В. Горбатов, В. М. Мусабаєв та інші науковці вивчали реологічні характеристики сиру кисломолочного і сиркових мас (СМ) в процесі механічної і термічної обробки, проте реологічні характеристики сиркових мас зі структуроутворюючими компонентами не досліджувались.

З іншого боку, проведення гідродинамічних процесів визначає також витрати теплової і механічної енергії на виробництво продукту і, відповідно, його собівартість. Тому виникла необхідність дослідити гідродинамічні процеси у роторно-вихрових емульсорах, що проходять в сиркових масах зі структуроутворювачами в процесі їх термомеханічної обробки і розробити методику гідродинамічного і технологічного розрахунку роторно-вихрового емульсора.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалась згідно з науковим напрямком роботи кафедри обладнання харчових технологій Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя 06 “Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі”, держдоговірною темою 267–99 “Дослідження характеристик кислотних і кислотно сичужних молочно–білкових згустків в залежності від масової долі

вологи, масової долі жиру і сухих речовин” та договором про співпрацю між Тернопільським національним технічним університетом ім. І. Пулюя і Технологічним інститутом молока і м’яса Національної академії аграрних наук України від 15.04.2008.

Автор особисто приймав участь у проведенні теоретичних і експериментальних досліджень, розробленні методик досліджень, обробці, аналізі й узагальненні отриманих результатів.

Метою роботи є встановлення оптимальних параметрів роботи роторно-вихрового емульсора у виробництві сиркових мас зі структуроутворювачами та розробка методики гідродинамічного і технологічного розрахунку апаратів такого типу.

Завдання дослідження:

- дослідити зміну реологічних характеристик сиркової маси зі структуроутворювачами в процесі термомеханічної обробки і встановити шляхи їх регулювання;

- встановити вплив реологічних характеристик продукту на витрати потужності;

- дослідити витрати потужності в РВЕ в залежності від параметрів роботи;

- розробити методику визначення рівня механічної обробки сиркових мас;

- розробити методику гідродинамічного і технологічного розрахунку РВЕ;

- встановити оптимальні параметри роботи РВЕ при виробництві СМ зі структуроутворювачами.

Об’єкт дослідження. Об’єктами дослідження обрано: композиційну сиркову масу зі структуроутворювачем і роторно-вихровий емульсор.

Предмет дослідження – реологічні характеристики сиркової маси, гідродинамічні процеси в РВЕ.

Методи дослідження. У роботі використані стандартні та загальновідомі методи досліджень. Зокрема: реологічні показники визначено на ротаційному віскозиметрі «Rheotest 2» в системі співвісних циліндрів; мікроструктуру – на світловому мікроскопі «Motic» зі вбудованою відеокамерою; вимірювання потужності і частоти обертання ротора здійснено за допомогою комп’ютеризованої системи керування на базі контрольно-управляючої системи фірми Lenze; вимірювання температури проводили контактним методом за допомогою хромель-копелевих термопар. Проаналізовано й оцінено достовірність отриманих результатів.

Наукова новизна одержаних результатів. В результаті дослідження реологічних характеристик СМ, а також комплексного дослідження гідродинамічних процесів у РВЕ:

- вперше отримано математичні співвідношення, які описують зміну реологічних характеристик СМ із структуроутворювачем в процесі механічної і термічної обробки;

- встановлено закономірності впливу реологічних характеристик СМ і параметрів роботи РВЕ на витрату споживаної ним потужності;

- отримано критеріальні рівняння для визначення потужності при обробці СМ в РВЕ;

- встановлено, що зменшення витрат потужності РВЕ досягається шляхом регулювання реологічних характеристик СМ;

- вперше розроблена методика визначення рівня механічної обробки СМ.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій. Наукові положення, рекомендації та висновки дисертаційної роботи обґрунтовані і підтверджені значним обсягом експериментальних досліджень і випробувань в широкому діапазоні режимних параметрів. Достовірність отриманих результатів забезпечується застосуванням сучасних засобів вимірювань та використанням методів статистичної обробки експериментальних даних.

Практичне значення одержаних результатів:

- встановлені математичні закономірності зміни ефективної в'язкості, напруження зсуву, граничного напруження зсуву СМ можуть бути застосовані для розрахунку дозаторів, pomp, змішувачів та іншого обладнання;

- обґрунтовано можливість використання в інженерних розрахунках реологічних характеристик, які визначають завершення процесу структуроутворення;

- встановлено, що досягнути температури пастеризації СМ можна шляхом гідродинамічної обробки в РВЕ;

- визначені оптимальні параметри обробки СМ в РВЕ, які дозволяють зменшити енерговитрати;

- розроблена методика гідродинамічного і технологічного розрахунку РВЕ.

Результати досліджень підтверджено деклараційним патентом України на корисну модель №4117 “Роторно-вихровий емульсор”.

Особистий внесок здобувача. Автор сформулював мету і задачі роботи, розробив програму і методику досліджень. Виконав дослідження реологічних характеристик СМ зі структуротворювачами, за результатами яких отримав математичні залежності. Провів дослідження витрат потужності в РВЕ. Одержав критеріальне рівняння для визначення потужності і встановив оптимальні параметри роботи РВЕ в процесі обробки СМ. Розробив методику визначення рівня механічної обробки СМ в РВЕ. Автор був основним виконавцем під час проведення і математичного опрацювання результатів експериментів, у підготовці публікацій і оформленні патентної документації.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідались і обговорювались на: 70-й, 73-й, 74-й наукових конференціях молодих вчених, аспірантів і студентів (2004, 2007, 2008, НУХТ, Київ); Міжнародній науково-технічній конференції “Інноваційні технології проблеми якості і безпеки сировини та готової продукції у м'ясній та молочної промисловості” (2007, НУХТ, Київ); XII Міжнародній науковій конференції “Удосконалювання процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв” (2008, ОНАХТ, Одеса); 3-й, 4-й та 7-й...13-й науково-технічних конференціях ТДТУ "Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино- і приладобудуванні" (1998, 2000, 2003 ... 2009, ТДТУ, Тернопіль).

Публікації. За результатами досліджень отримано 1 Деклараційний патент України, опубліковано 7 наукових статей, з яких 7 – у фахових наукових виданнях. Також результати досліджень обговорювалися на 13 наукових конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, семи розділів основної частини, висновків, списку використаної літератури, що налічує 133 найменування на 142 сторінках і 5-ти додатків на 20 сторінках. Робота містить 5 таблиць та 59 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі висвітлено стан проблеми, обґрунтовано актуальність проведення кандидатського дослідження, встановлено зв'язок із науковими програмами організацій, де виконувалася робота, визначено мету роботи та завдання; сформульовано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, що виносяться на захист; визначено особистий внесок здобувача; подано перелік наукових конференцій, де були оприлюднені результати наукових досліджень.

У першому розділі подано огляд літературних джерел, де розглянуто сучасні технічні рішення з машинно-апаратного оформлення технологічних процесів виробництва СМ, а також аналіз досліджень реологічних характеристик СМ і процесів перемішування.

Серед спеціалізованого обладнання для проведення термомеханічної обробки композиційних продуктів на основі сиру кисломолочного виділено апарати двох типів: зі стаціонарною камерою типу “Штефан” та апарати з роторно-вихровим пристроєм і циркуляційним контуром. Показано, що значно ефективнішим з точки зору енергетичних витрат є обладнання з циркуляційним контуром і роторно-вихровим пристроєм (біля 0,09 кВт/кг проти 0,11 кВт/кг продукту в апаратах типу “Штефан”). Серед апаратів такого типу, які експлуатуються в Україні, виділено РВЕ розробки ТІММ НААНУ.

Проведений аналіз робіт з дослідження впливу технологічних факторів на зміну реологічних характеристик СМ, а також аналіз технічних засобів для їх визначення. Проаналізовано гідродинамічні процеси, які супроводжують процес перемішування і диспергування СМ в РВЕ. Обґрунтовано недостатність теоретичної і експериментальної бази для розрахунку процесу обробки в РВЕ. Зроблені відповідні висновки і сформульовані завдання дослідження.

У другому розділі обґрунтовано вибір методик проведення наукових досліджень. Спершу було вибрано рецептуру композиційного продукту з типовим для СМ вмістом основних компонентів (сир кисломолочний, вода, структуроутворювач, харчосмакові добавки), методи контролю технологічних параметрів. Для вибору модельного продукту використали запропонований А. В. Горбатовим коефіцієнт складу сирної маси K . Дослідження проводили для продукту ТУ 49 832-81 “Продукт кисломолочний з фруктово-ягідними і смаковими наповнювачами” (“Ягідка”). Визначені основні реологічні характеристиками продукту, що впливають на гідродинамічні процеси в РВЕ:

ефективна в'язкість, напруження зсуву, граничне напруження зсуву, темп руйнування структури. Запропоновано методики визначення та розрахунку реологічних характеристик СМ з використанням приладу "Реотест-2". Також обрано методи математичної обробки результатів експериментів.

Представлена експериментальна установка для проведення термомеханічної обробки маси, яка є моделлю РВЕ (рис.1). Теплову обробку продукту здійснювали в робочій ємкості 1 через теплообмінну сорочку 4. Для запобігання пригорання продукту використано скребкову мішалку 5. Механічна обробка здійснювалася шляхом циркулювання продукту через пару ротор-статор, мінімальний проміжок між якими становить 0,4 мм. Привід здійснювався за допомогою електродвигуна з регульованим числом обертів ($0 < n < 4000$ об/хв). Для керування приводом і вимірювання обертового моменту використано комп'ютеризовану систему 9 на базі контрольно-управляючої системи фірми Lenze. Температуру робочої суміші визначали за допомогою терморпори 10. Відбір проб здійснювали через патрубок 11.

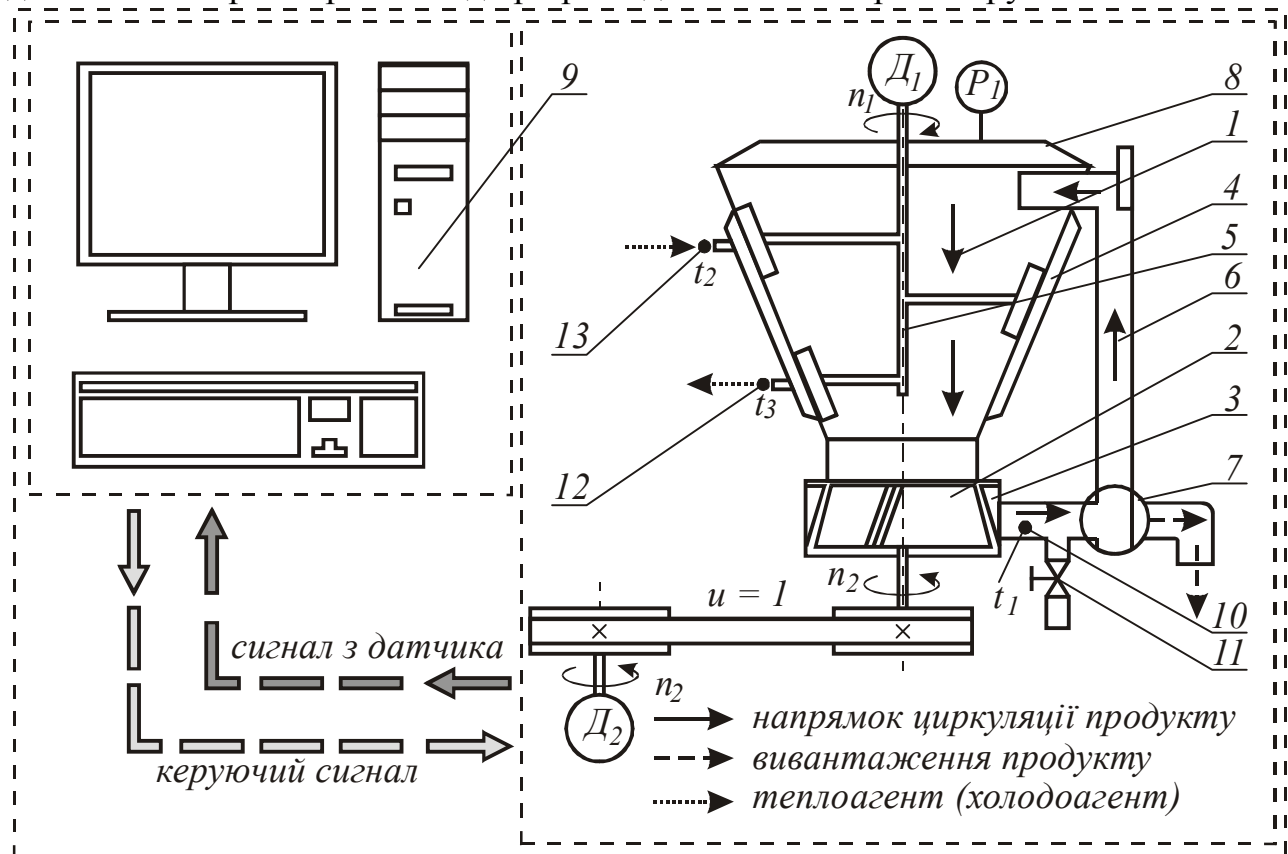


Рис. 1. Схема експериментальної установки:

1 – робоча ємкість; 2 – ротор; 3 – статор; 4 – сорочка; 5 – скребкова мішалка; 6 – циркуляційний трубопровід; 7 – триходовий кран; 8 – кришка; 9 – комп'ютерна система керування; 10, 12, 13 – терморпори; 11 – відбір проб; D_1 , D_2 – електродвигуни; P_1 – мановакууметр.

У третьому розділі подано результати експериментальних досліджень реологічних характеристик СМ в процесі термічної і механічної обробки. Температуру нагріву маси змінювали в межах 10...65 °С, що відповідає ТУ на

виготовлення таких продуктів. Ступінь механічної обробки ототожнювали з числом циклів циркуляції продукту по замкнутому контурі (до 500 циклів).

Для математичної обробки реологічних характеристик використовували: формулу Оствальда-де Вілля: $\tau_r = B^* \gamma^n$,

де τ_r – напруження зсуву між шарами продукту, Па; B^* – в'язкість при одиничному значенні градієнта швидкості, Па·с; γ – градієнт швидкості, с^{-1} ; n – індекс течіння

або формулу Гершеля-Балклі: $\tau_r = \tau_0 + B^* \gamma^n$,

де τ_0 – граничне напруження зсуву, Па.

Результати досліджень показали, що СМ можна віднести до псевдопластичної рідини, для якої характерна залежність напруження зсуву і ефективної в'язкості від швидкості зсуву в усьому діапазоні проведення експериментів.

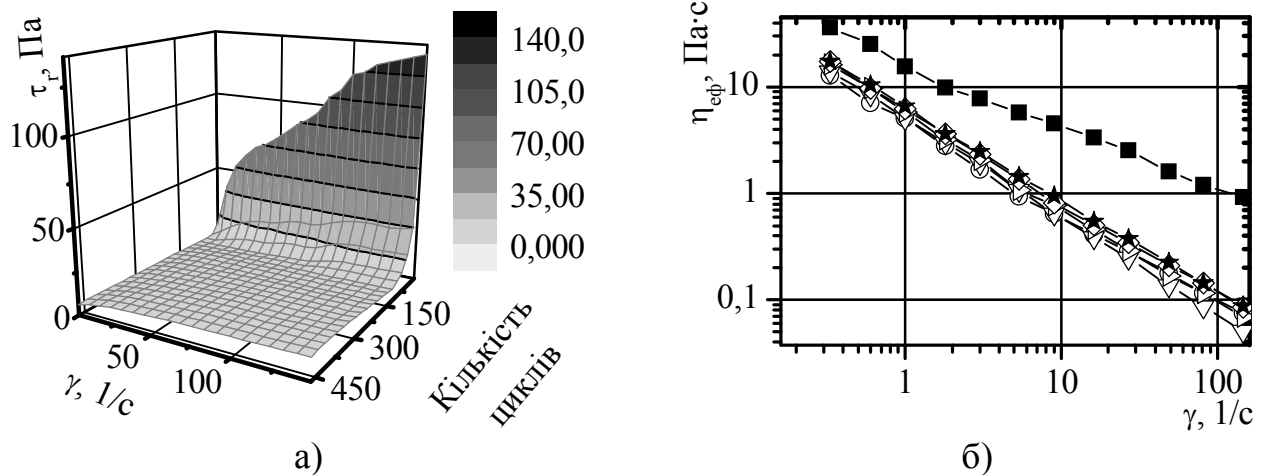


Рис. 2. Залежність напруження зсуву (а) і ефективної в'язкості (б) від швидкості зсуву при $t = 10^\circ\text{C}$:

■ – 0 циклів; ○ – 14 циклів; ▽ – 89 циклів; ▷ – 215 циклів; ◇ – 356 - циклів; ★ – 465 циклів.

Руйнування структури СМ проходить протягом перших циклів обробки. Так при 20 циклах обробки напруження зсуву зменшується у 2,1 раз, далі спостерігається постійне незначне зростання напруження зсуву і ефективної в'язкості протягом всього періоду механічної обробки продукту. Це викликано процесами, які проходять на мікрорівні, зокрема явищами локального нагріву, а також набуханням структуроутворювача.

Максимальні значення реологічних характеристик спостерігаються на початковому етапі процесу механічної обробки при $z=0$ циклів циркуляції і температурі 10°C (рис. 2). Відповідно рівняння мають вигляд:

$$\text{за формулою Оствальда-де Вілля } \tau_r = 12,5 \cdot \gamma^{0,42}. \quad (1)$$

$$\text{за формулою Гершеля-Балклі } \tau_r = 9,1 + 11,5 \cdot \gamma^{0,47}. \quad (2)$$

В процесі нагріву маси з незруйнованою структурою (рис. 3) від температури 10°C до 40°C граничне напруження зсуву зменшувалось від

12,5 Па до 10 Па. Швидке зростання граничного напруження зсуву до 11,6 Па (16%) спостерігається при нагріванні від 40 °С до 65 °С, що викликано структуроутворенням пектину, яке відбувається при температурі 52...55 °С.

При температурі пастеризації (65 °С) рівняння мають вигляд:

$$\text{Оствальда-де Вілля } \tau_r = 11,6 \cdot \gamma^{0,41}. \quad (3)$$

$$\text{Гершеля-Балклі: } \tau_r = 9,3 + 9,6 \cdot \gamma^{0,43}. \quad (4)$$

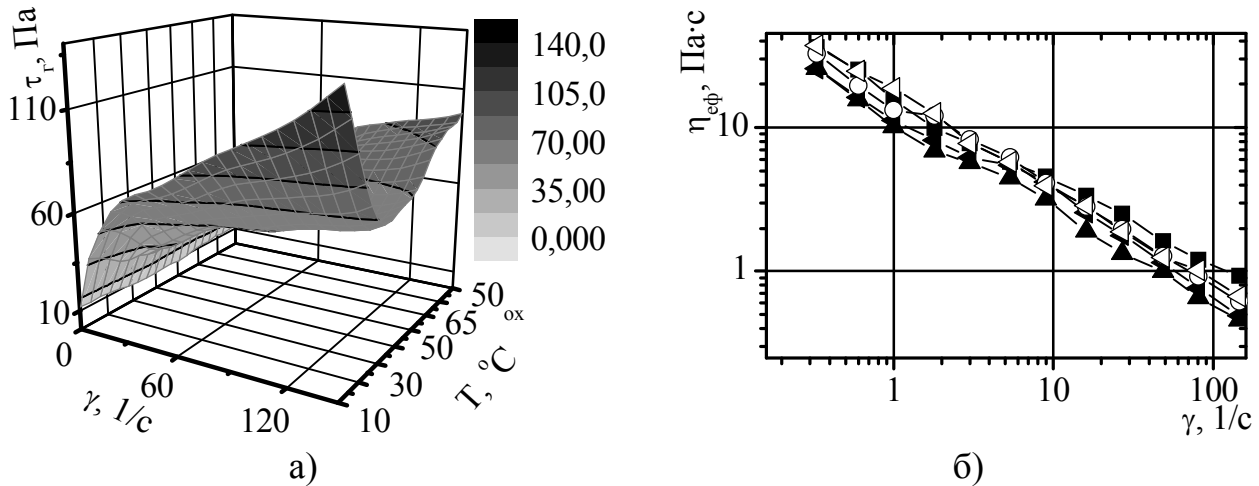


Рис. 3. Залежність напруження зсуву (а) і ефективної в'язкості (б) для продукту "Ягідка" (ТУ 49 832-81) від швидкості зсуву від температури при $z=0$:

■ – 10 °С; ▲ – 30 °С; ◀ – 50 °С; ○ – 65 °С; ▶ – 50_{ох} °С.

Враховуючи різновекторність впливу механічної обробки і температури на реологічні характеристики СМ, були проведені дослідження під час її термомеханічної обробки, яка здійснювалася нагріванням маси в ємкості з циркуляцією через роторно-вихровий емульсор. В цілому зміну реологічних характеристик можна поділити на два етапи: перший – до досягнення температури структуроутворення пектину – характерний для механічної обробки, другий при температурі понад 50 °С – характерний для теплової обробки. Водночас значення напруження зсуву і ефективної в'язкості залишаються дещо нижчими, ніж при нагріві без механічної обробки (рис. 4). Тобто, для двох характерних точок, які визначаються максимальними значеннями напруження зсуву і ефективної в'язкості (початок процесу і при температурі пастеризації), з достатньою точністю можна використовувати формули (1,2,3,4).

Встановлено взаємозв'язок реологічних характеристик з урахуванням дії механічного і теплового чинника (при $T=10...65^{\circ}\text{C}$, $z=0...160$ циклів, $\gamma=0...1000\text{c}^{-1}$) у вигляді:

за формулою Оствальда-де Вілля:

$$\eta_{\text{eff}} = 0,09 \cdot \eta_{\text{eff}_m}^{-0,67} \cdot \eta_{\text{eff}_m}^{1,35} \quad (5)$$

m , m - індекси, які вказують на спосіб обробки – відповідно для механічної і теплової обробки;

за формулою Гершеля-Балклі:

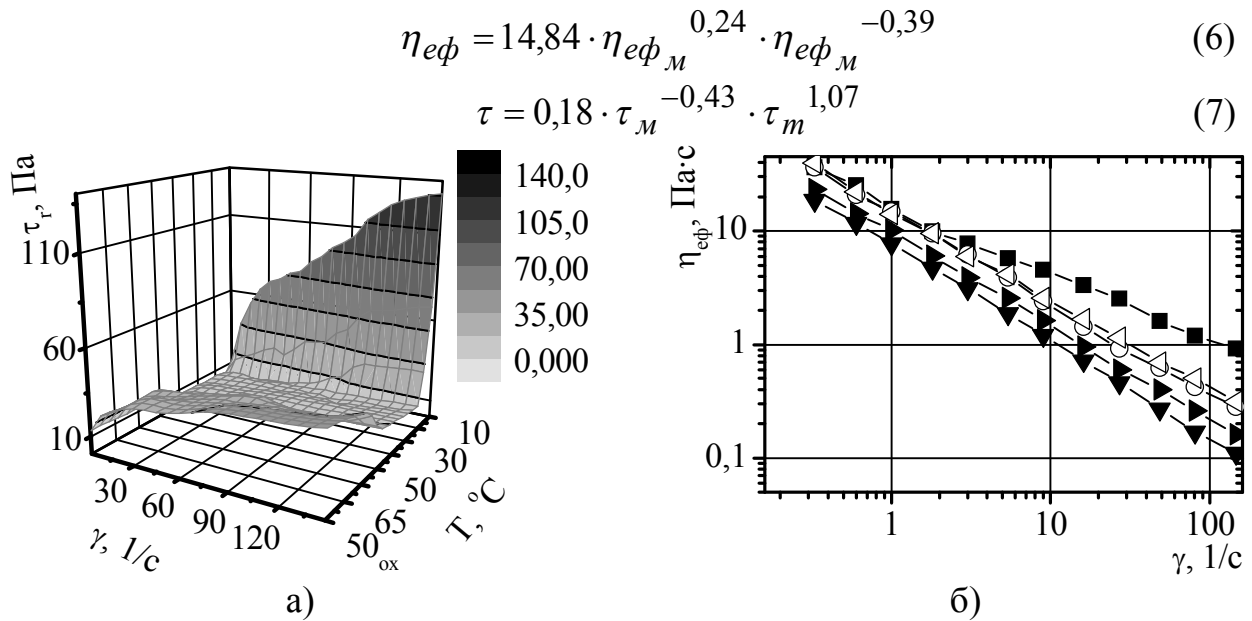


Рис. 4. Залежність напруження зсуву (а) і ефективної в'язкості (б) від швидкості зсуву при термомеханічній обробці:

■ – 10 °С ($z = 0$); ▼ – 30°С ($z = 44$); ► – 50°С ($z = 112$); ○ – 65°С ($z = 142$); ◁ – 50_{ox} °С ($z = 152$).

Враховуючи, що максимальні значення напруження на початковому етапі процесу обробки очевидно визначаються властивостями твердої фази, були проведені дослідження реологічних характеристик СМ при вмісті сиру кисломолочного у розрахунку від 20% до 100% від кількості, передбаченої рецептурою (рис.5). В ємкість завантажувалися рідкі компоненти і відповідна кількість сиру кисломолочного.

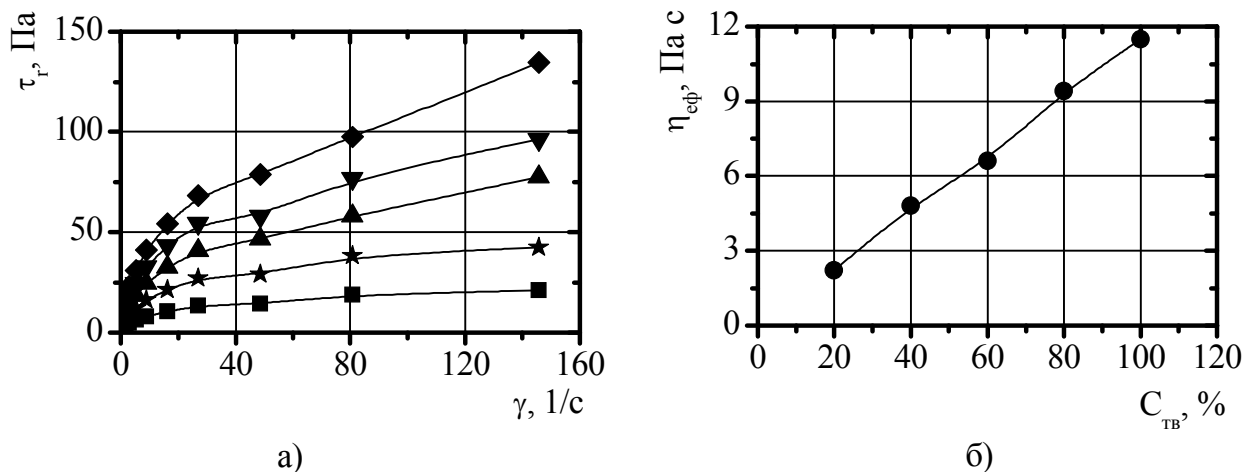


Рис. 5. Напруження зсуву (а) і граничне напруження зсуву (б) при різних концентраціях сирної маси:

■ – 20%; ★ – 40%; ▲ – 60%; ▼ - 80%; ◆ - 100%.

Зі збільшенням концентрації сиру кисломолочного напруження зсуву зростає у всьому діапазоні швидкостей (рис. 5). Початкове напруження зсуву при зміні концентрації від 20% до 100% змінюється з 4 до 12,5 Па. Отримане

співвідношення граничного напруження зсуву від концентрації сиру кисломолочного $C_{m\phi}$ (в %) таке:

$$\tau_0(C_{m\phi}) = 0,109 \cdot C_{m\phi}. \quad (8)$$

У четвертому розділі представлено результати дослідження витрат потужності на проведення гідродинамічних процесів в РВЕ.

Враховуючи те, що загальноприйнята для перемішувачів пристроїв критеріальна залежність типу $Eu_m = f(Re)$ не повністю відповідає гідродинамічним процесам, які проходять в парі ротор-статор у зв'язку з тим, що тут крім перемішування, відбувається і подрібнення з транспортуванням, для теоретичного визначення потужності був вибраний метод розмірностей. Незалежними параметрами вибрано (кг, м, с). Параметри, які характеризують гідродинамічний процес обробки, такі:

фізичні параметри: густина СМ ρ , кг/м³; ефективна в'язкість СМ η_{ef} , (Па·с); напруження зсуву СМ τ_0 , Н/м²;

кінематичні параметри роботи ротора: число обертів n , 1/с; осьова швидкість руху продукту v , м/с;

геометричні параметри: діаметр ротора d , м.

Співвідношення представлено у вигляді:

$$N = C \cdot n^a \cdot \rho^b \cdot \eta_{ef}^c \cdot d^f \cdot v^h \cdot \tau^j \quad (9)$$

Отримано рівняння:

$$Eu_m = C \cdot Re_m^c \cdot K_v^h \cdot K_F^j, \quad (10)$$

де C – коефіцієнт, який враховує конструктивні особливості пари ротор-статор;

$Eu_m = \frac{N}{n^3 \cdot d^5 \cdot \rho}$ – модифікований критерій Ейлера (критерій потужності);

$Re_m = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho}{\eta_{ef}}$ – модифікований критерій Рейнольдса для обертального руху.

руху.

$K_v = \frac{v}{n \cdot d}$ – комплекс швидкості – співвідношення між коловою і лінійною швидкістю руху.

$K_F = \frac{\tau}{n^2 \cdot d^2 \cdot \rho}$ – комплекс напружень – співвідношення між

напруженням зсуву і відцентровим зусиллям в турбінці;

c, h, j – дослідні константи.

Для встановлення дослідних коефіцієнтів в рівнянні (5) було проведено експериментальні дослідження з використанням установки (рис. 1). Після встановлення частоти обертання ротора вмикали привід роторно-вихрового механізму і здійснювали замір обертального моменту під час роботи без навантаження. Далі в робочу ємкість було завантажено рецептурну суміш масою 5кг. Число обертів ротора n змінювали від 1000 об/хв до 4000 об/хв. В

теплообмінну сорочку подавали гарячу воду. Необхідно зауважити, що при $n < 2000$ об/хв, циркулювання маси по замкнутому контурі не відбувається. Тому далі експерименти проводили при $n > 2000$ об/хв. Одночасно визначали продуктивність і число циклів циркуляції продукту. Завершенням процесу обробки (точка А) (рис. 6) вважали досягнення СМ температури пастеризації.

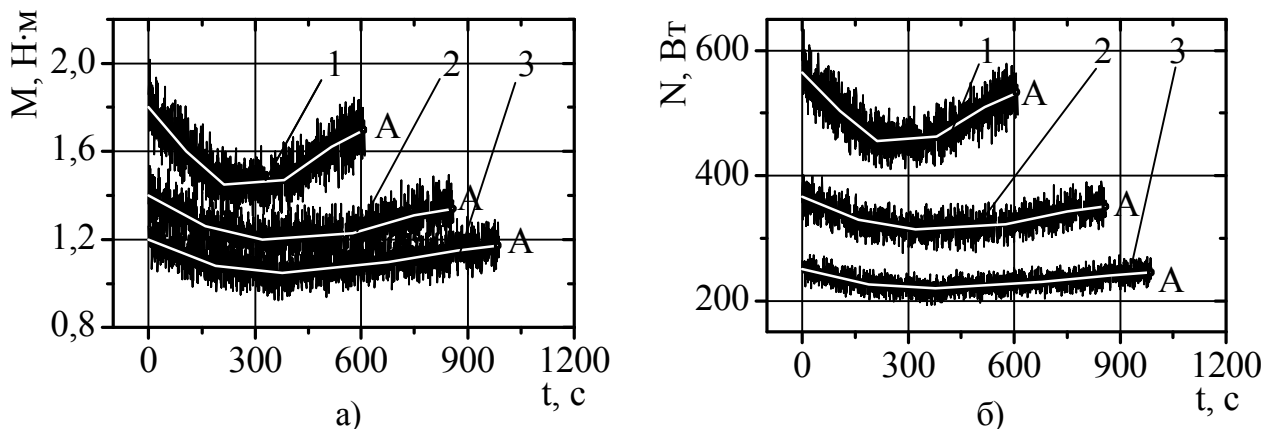


Рис. 6. Зміни обертового моменту (а) і витраченої потужності (б):
1 – для $n = 3000$ об/хв; 2 – для $n = 2500$ об/хв; 3 – для $n = 2000$ об/хв; А – завершення процесу обробки.

За умови підвищення числа обертів ротора потужність зростає за експоненціальною залежністю, числа циклів циркуляції залишаються майже постійними, а тривалість обробки зменшується. Після математичної обробки результатів експериментальних досліджень одержали критеріальне рівняння у вигляді:

$$Eu_m = 0,02 \cdot Re_m^{0,07} \cdot \left(\frac{v}{n \cdot d} \right)^{-0,97} \cdot \left(\frac{\tau}{n^2 \cdot \rho \cdot d^2} \right)^{0,04} \quad (11)$$

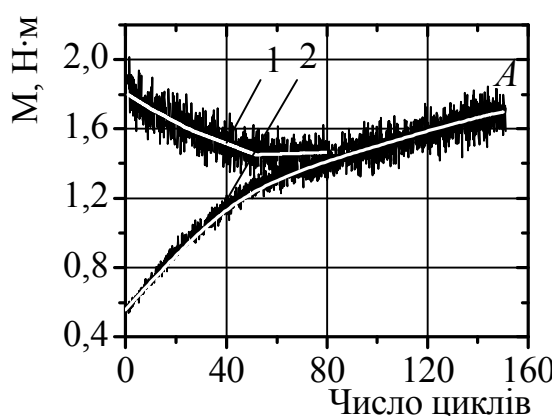


Рис. 7. Зміна обертового моменту в процесі обробки продукту:

1 – у випадку обробки рецептурної суміші; 2 – у випадку поступового дозування твердої фракції.

Можна зауважити, що характер зміни потужності (рис.6) при сталому n відповідає зміні реологічних характеристик в процесі термомеханічної обробки. При цьому максимальні значення потужності спостерігалися на початку процесу обробки при $z = 0$. Проведені експерименти з поступовим дозуванням сиру кисломолочного в рідку фракцію показали, що обертовий момент в початковій фазі зменшується до 75% (рис. 7). При цьому зниження загальних витрат енергії становить до 20%.

Проведено експерименти щодо визначення впливу гідродинамічної обробки на нагрів продукту. Так, при числі обертів $n = 3000$ об/хв і циклів циркуляції $z = 850$ для СМ масою 5 кг була досягнута температура пастеризації. Це дало можливість зробити висновок, що при невеликих об'ємах СМ температуру пастеризації можна досягнути за рахунок гідродинамічної обробки.

Для визначення потужності, необхідної для приводу скребкової мішалки було використано загальноприйняте рівняння $Eu = f(Re)$, яке при $0,5 < n_m < 25$ об/хв має вигляд:

$$Eu_m = C \cdot Re_k^{-1,44}, \quad (12)$$

де Eu_m – модифікований критерій Ейлера; $Re_k = \frac{n_m \cdot d_m^2 \cdot \rho}{\eta_{ef}}$ – критерій

Рейнольдса; n_m – частота обертання мішалки, об/с; d_m – середній діаметр мішалки, м; x – показник степеня; $C = 3,6 \cdot 10^4$ – конструктивна константа.

Важливим фактором забезпечення структури СМ є подрібнення твердої фракції (сиру кисломолочного) і забезпечення рівномірної концентрації компонентів рецептурної суміші. Для теоретичного дослідження процесу розглянули спрощену модель руху маси в роторно-вихровому пристрої в припущенні, що подрібнення проходить в об'ємі маси між ротором і статором (зона I, рис. 8). Об'єм маси, яка знаходиться в каналах (зона II, рис. 8) транспортується з мінімальною обробкою. Співвідношення між вказаними об'ємами ψ прийняли еквівалентним співвідношенню між площами поперечного перерізу відповідних зон в нижній частині пари ротор-статор. Тоді об'єм продукту, який обробляється за один цикл, – $\psi \cdot V_0$, відповідно об'єм необробленої маси – $(1 - \psi) \cdot V_0$.

Механічну обробку поточного об'єму сиркової маси оцінювали за формулою:

$$V_{\sigma}^{(\kappa)} = \frac{i!}{(i - \kappa)! \cdot \kappa!} \cdot \psi^{\kappa} \cdot (1 - \psi)^{i - \kappa} \cdot V_0, \quad (13)$$

де V_{σ} – поточний об'єм СМ; i – поточний цикл; κ – кратність обробки на даному етапі.

Об'єм обробленого дану кількість разів продукту V_r становить:

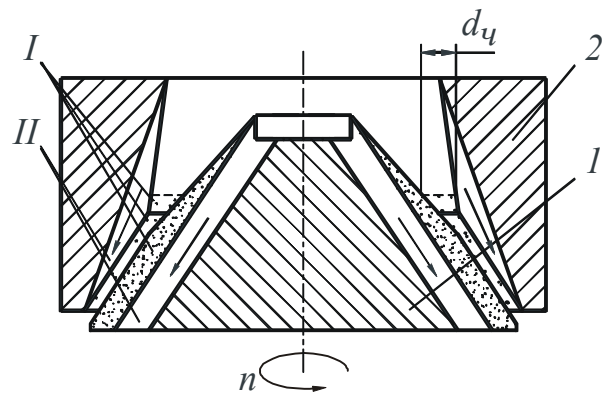


Рис. 8. Схема руху сиркової маси в каналах РВЕ:

1 – ротор; 2 – статор; I – зона транспортування і механічної обробки сиркової маси; II – зона транспортування без механічної обробки сиркової маси.

$$V_r = V_0 \cdot \sum_{\kappa=r}^i \frac{i!}{(i-\kappa)! \cdot \kappa!} \cdot \psi^\kappa \cdot (1-\psi)^{i-\kappa}. \quad (14)$$

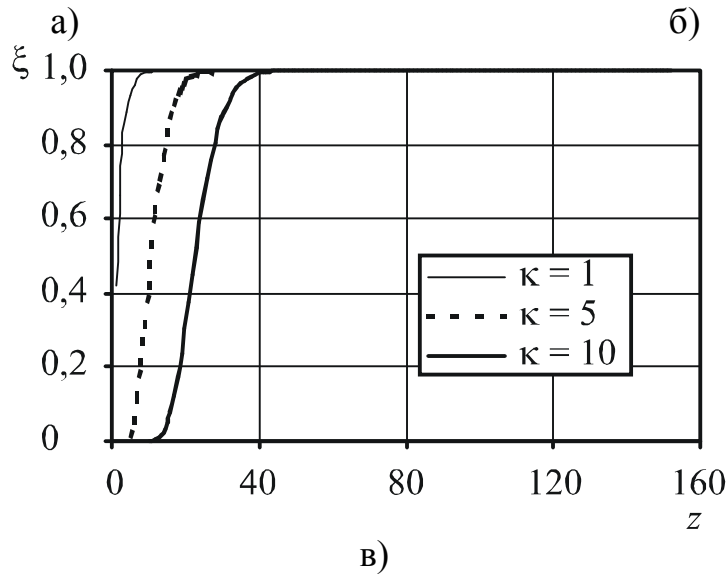
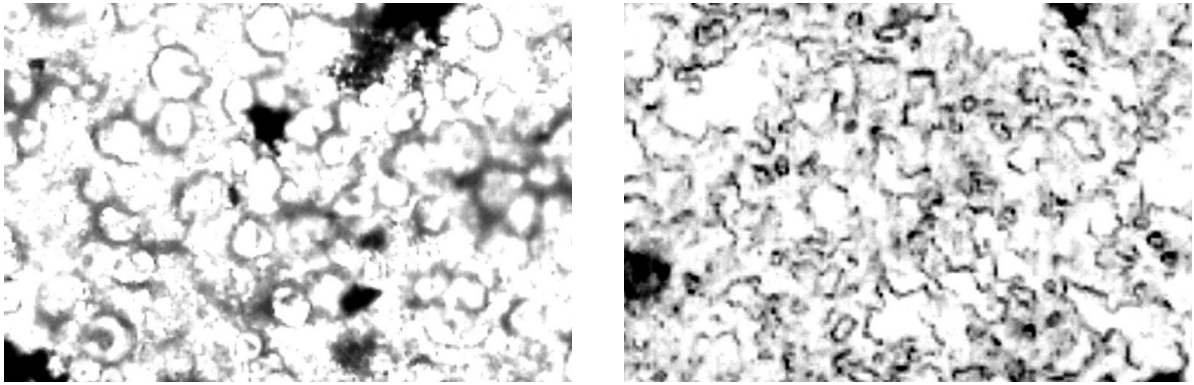


Рис. 9. Мікроструктура продукту:

а) мікроструктура сиркової маси до його обробки; б) мікроструктура сиркової маси після 45 циклів обробки; в) механічна обробки продукту в залежності від кількості циклів обробки.

Відношення об'єму сировини V_r , обробленої достатню кількість разів, до її початкової кількості V_0 характеризує коефіцієнт механічної обробки ξ :

$$\xi = \frac{V_r}{V_0} = \frac{V_0 \cdot \sum_{\kappa=r}^i \frac{i!}{(i-\kappa)! \cdot \kappa!} \cdot \psi^\kappa \cdot (1-\psi)^{i-\kappa}}{V_0} = \sum_{\kappa=r}^i \frac{i!}{(i-\kappa)! \cdot \kappa!} \cdot \psi^\kappa \cdot (1-\psi)^{i-\kappa}. \quad (15)$$

Так, наприклад, при 45 циклах обробки 95% СМ пройшли механічну обробку (рис. 9, в). Дослідження мікроструктури продукту (рис. 9 а, б) підтвердили одержані теоретичні залежності. Максимальний розмір частинок СМ становив 0,2 мм.

Для встановлення оптимальних параметрів роботи вибрано показники оцінки РВЕ як перемішуючого пристрою: ступінь перемішування, інтенсивність та питомі витрати енергії. Оцінку ступеня перемішування здійснено за концентрацією молочного жиру.

Ступінь перемішування I визначено за формулою:

$$I = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \quad (16)$$

де x_1, x_2, \dots, x_n – відносна концентрація взятих проб, яка розраховується за формулою: $x_i = \frac{C_i}{C_{i0}}$, C_i, C_{i0} – об'ємні долі компонента в i -й пробі і апараті.

Встановлено, що при 50-ти циклах механічної обробки, забезпечується рівномірний розподіл концентрацій молочного жиру в масі сиркового продукту. Подальше перемішування і механічна обробка практично не впливають на розподіл жиру.

Інтенсивність обробки сиркової маси в роторно-вихровому емульсорі визначали за витратами потужності на здійснення повного технологічного циклу обробки на одиницю маси при постійній частоті обертання:

$$I_A = \frac{A_m}{m \cdot T}, \quad (17)$$

де m – маса рецептурної суміші, кг;

T – тривалість технологічного процесу обробки в РВЕ, с;

A_m – загальні витрати механічної енергії на привід ротора за весь цикл:

$$A_m = \int_{t_{поч}}^{t_{кін}} N \cdot dt; \quad (18)$$

$t_{поч}, t_{кін}$ – відповідно початковий і кінцевий моменти часу, с.

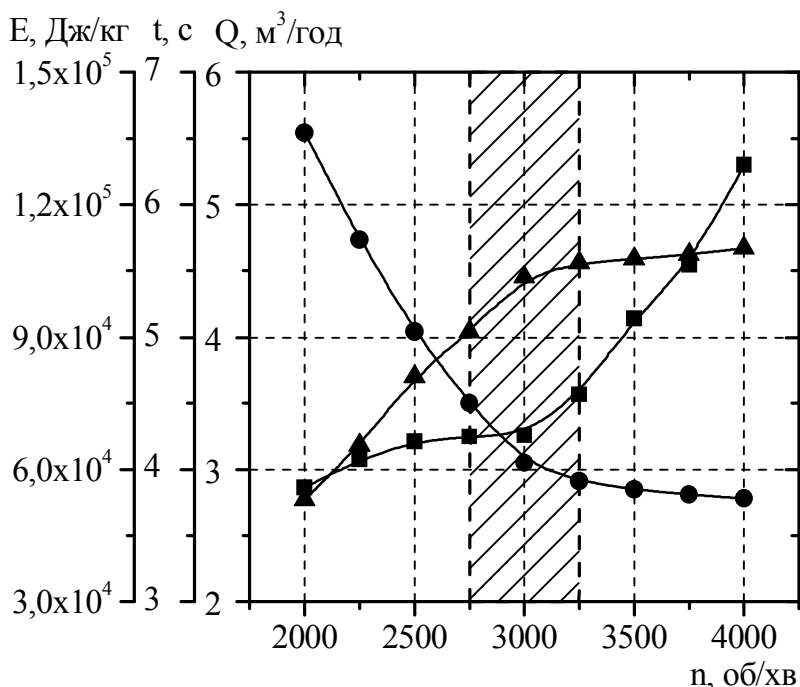


Рис. 10. Параметри роботи роторно-вихрового емульсора:

■ – питомих витрати енергії E ; ▲ – тривалість циклу циркуляції t ; ● – продуктивність Q .

При збільшенні частоти обертання ротора від 2000 об/хв до 3000 об/хв спостерігається зростання інтенсивності механічної обробки в 1,97 разів від 55,42 Вт/кг до 111,02 Вт/кг. При подальшому підвищенні частоти обертання ротора інтенсивність механічної обробки зростає і при $n = 4000$ об/хв складає 226,34 Вт/кг.

Питомих витрати енергії E в парі ротор-статор на одиницю маси обробленого продукту до досягнення заданого технологічного ефекту

(температури пастеризації) (рис. 10) визначали за формулою:

$$E = \frac{A_m}{m}. \quad (19)$$

На ділянці 2000 об/хв ... 3000 об/хв питомі витрати енергії зростають в 1,3 рази, проте від 3000 об/хв до 4000 об/хв вони зростають удвічі, причому це зростання набуває експоненціального характеру (рис. 10).

Щодо продуктивності установки, то зі збільшенням числа обертів ротора вона зростає, проте при $n > 3250$ об/хв стає майже постійною.

Обернено до продуктивності змінюється тривалість обробки. Таким чином, оптимальні енергетичні і технологічні параметри емульсора знаходяться в межах 2750...3250 об/хв.

В п'ятому розділі досліджено реологічні характеристики та витрат потужності при обробці в РВЕ СМ ТУ У 46.39.ГО.002-94 "Десерт кисломолочний солоний". Встановлено, що для опису залежності реологічних характеристик від рівня механічної обробки і температури можна застосувати отримані рівняння із врахуванням коефіцієнту складу маси K . Проведені дослідження підтвердили адекватність одержаних рівнянь для розрахунку потужності.

В шостому розділі розроблено методику гідродинамічного і технологічного розрахунку РВЕ. Основні етапи розрахунків передбачають визначення кількості теплоти, потужності і тривалості обробки.

В сьомому розділі представлено результати впровадження виконаних в дисертації досліджень.

ВИСНОВКИ

1. Результати аналізу наукових публікацій та проведених наукових досліджень свідчать, що для термомеханічної обробки сиркових мас перспективним є використання роторно-вихрових емульсорів, які дозволяють забезпечити їх рівномірну термічну і механічну обробку;

2. Сиркову масу можна віднести до неньютонівських псевдопластичних рідин, які визначаються такими реологічними характеристиками, як ефективна в'язкість, напруження зсуву, граничне напруження зсуву, темп руйнування структури.

3. Встановлено, що руйнування структури маси проходить протягом перших 20 циклів циркулювання продукту, а нагрів маси проходить при цілковито зруйнованій структурі.

4. Гідродинамічна обробка сиркової маси в роторно-вихровому емульсорі спричиняє її нагрівання до температури пастеризації, встановленої технічними умовами на виготовлення продукту.

5. Реологічні характеристики сиркової маси при дії механічного і теплового чинника можна представити у вигляді:

за формулою Оствальда-де Вілля:

$$\eta_{ef} = 0,09 \cdot \eta_{ef,m}(z)^{-0,67} \cdot \eta_{ef,m}(T)^{1,35};$$

за формулою Гершеля-Балклі:

$$\eta_{ef} = 14,84 \cdot \eta_{ef,m}(z)^{0,24} \cdot \eta_{ef,m}(T)^{-0,39};$$

$$\tau = 0,18 \cdot \tau_m(z)^{-0,43} \cdot \tau_m(T)^{1,07}.$$

6. З метою спрощення конструкторських розрахунків роторно-вихрового емульсора рекомендовано використовувати реологічні характеристики, які описують завершення процесу структуроутворення у вигляді залежності Оствальда-де Вілля – $\tau_r = 10,15 \cdot \gamma^{0,30}$ при $T = 10 \dots 65^\circ\text{C}$ і $\gamma = 0 \dots 150 \text{c}^{-1}$.

7. Для обладнання, яке працює за умови малих швидкостей (дозатори) рекомендовано використовувати залежності, які характеризують завершення процесу обробки у вигляді рівняння Гершеля-Балклі: $\tau_r = 11,2 + 5,55 \cdot \gamma^{0,35}$ при $T = 10 \dots 65^\circ\text{C}$ і $\gamma = 0 \dots 150 \text{c}^{-1}$.

8. Зменшити початкові значення реологічних характеристик сиркової маси можна шляхом поступового дозування твердої фракції в межах до 20% від загального вмісту через 10...15 циклів обробки.

9. При розрахунку потужності для приводу роторно-вихрового емульсора необхідно враховувати комплекс швидкості $K_v = \frac{v}{n \cdot d}$, який характеризує швидкість руху продукту через роторно-вихровий пристрій та комплекс напружень $K_F = \frac{\tau}{n^2 \cdot \rho \cdot d^2}$, який враховує граничне напруження зсуву маси.

10. Критеріальне рівняння для визначення потужності роторно-вихрового пристрою РВЕ в діапазоні $2000 \leq n \leq 3000$ при $95 < \text{Re}_m < 270$ має вигляд:

$$Eu_m = 0,02 \cdot \text{Re}_m^{0,07} \cdot K_v^{-0,97} \cdot K_F^{0,04},$$

і для визначення потужності мішалки в діапазоні $0,5 < n < 25$ при $0 < \text{Re}_k < 4$: $Eu_m = 3,56 \cdot 10^4 \cdot \text{Re}_k^{-1,44}$.

11. Механічну обробку довільної частки сиркової маси можна оцінювати за формулою:

$$V_{\bar{\sigma}} \binom{\kappa}{i} = \frac{i!}{(i-\kappa)! \cdot \kappa!} \cdot \psi^\kappa \cdot (1-\psi)^{i-\kappa} \cdot V_0.$$

12. Рівень механічної обробки маси запропоновано визначати показником механічної обробки, який представляє собою відношення об'єму маси, що оброблена достатньою кількістю разів, до загального об'єму маси:

$$\xi = \frac{V_r}{V_0} = \frac{V_0 \cdot \sum_{\kappa=r}^i \frac{i!}{(i-\kappa)! \cdot \kappa!} \cdot \psi^\kappa \cdot (1-\psi)^{i-\kappa}}{V_0} = \sum_{\kappa=r}^i \frac{i!}{(i-\kappa)! \cdot \kappa!} \cdot \psi^\kappa \cdot (1-\psi)^{i-\kappa}.$$

13. Оптимальні числа обертів роторно-вихрового пристрою коливаються в межах $2750 < n < 3250$ об/хв.

14. Розроблена методика гідродинамічного і технологічного розрахунку роторно-вихрових емульсорів дозволяє провести їх інженерні і технологічні розрахунки.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Єресько Г. О. Технологічне обладнання молочних виробництв. / Єресько Г. О., Шинкарик М. М., Ворощук В. Я. – К. : ЦНЛ “Інкос”, 2007.– 344с.

Особистий внесок дисертанта по п. 1: виконано огляд технологічного обладнання для виробництва сиркових мас.

2. М. Шинкарик. Структурний аналіз і синтез обладнання для термомеханічної обробки композиційних продуктів на основі молочного білка / М. Шинкарик, В. Ворощук // Наукові праці укр.держ.унів.харч.техн. – 2001р. – №10. – С.161.

Особистий внесок дисертанта по п. 2: здійснено структурний аналіз обладнання для термомеханічної обробки сиркових мас на основі молочного білка, запропоновано напрямки розробки нових технічних рішень на базі існуючих.

3. Шинкарик М. М. Розробка експериментального стенду для дослідження процесів змішування та термічної обробки композиційних продуктів на базі сиркових мас / Шинкарик М.М., Ворощук В.Я., Кімачинський С.І. // Тематичний збірник наукових праць Донецького державного університету економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського. – 2003, №9. – С.69-73.

Особистий внесок дисертанта по п. 3: здійснено розробку принципової схеми експериментального стенду для дослідження процесів змішування та термічної обробки при виробництві сиркових мас на основі сиркових мас, а також проаналізовано критерії оцінки ефективності його роботи.

4. М. Шинкарик. Дослідження впливу механічної обробки на процес нагріву десертних сиркових мас в роторно-вихровому емульсорі. / М. Шинкарик, В. Ворощук // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2006. – № 10. – С. 57–62.

Особистий внесок дисертанта по п. 4: виконано експериментальні дослідження впливу механічної обробки (змішування, подрібнювання, циркуляції) на нагрівання маси, а також одержано математичні залежності.

5. М. Шинкарик. Дослідження реологічних характеристик композиційних білкових продуктів на базі сиру домашнього при обробці у роторно-вихровому емульсорі / М. Шинкарик, В. Ворощук // Наукові праці національного університету харчових технологій. – 2007р. – №20. – С.28-31.

Особистий внесок дисертанта по п. 5: здійснено експериментальні дослідження реологічних характеристик сиркових мас при обробці у роторно-вихровому емульсорі з використанням установки Реотест-2, а також виконано математичну обробку результатів експерименту.

6. В. Ворощук. Кількісна оцінка рівня механічної обробки десертних мас на базі сиру домашнього в роторно-вихрових емульсорах. / В. Ворощук, М. Шинкарик // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2008 – №32. – С.116–120.

Особистий внесок дисертанта по п. 6: виконано експериментальні дослідження механічної обробки сиркових мас в роторно-вихровому емульсорі, експериментальні дослідження мікроструктури досліджуваних продуктів в процесі обробки, також виконано математичне вирішення задачі оцінки рівня механічної обробки сиркових мас на базі сиру кисломолочного в роторно-вихрових емульсорах.

7. М. Шинкарик. Дослідження затрат потужності в парі ротор-статор у роторно-вихрових емульсорах при виробництві композиційних продуктів на базі сиру домашнього / М. Шинкарик, В. Ворощук, Г. Єресько, С. Кимачинський // Вісник ТДТУ. – 2008, №2. – С.184-190.

Особистий внесок дисертанта по п. 7: виконано експериментальні дослідження витрат потужності в парі ротор-статор у роторно-вихровому емульсорі при виробництві сиркових мас на базі сиру кисломолочного, а також здійснено математичну обробку результатів досліджень.

8. Шинкарик М. М. Витрати енергії при механічній обробці продуктів в емульсорах роторно-вихрового типу / Шинкарик М. М., Ворощук В. Я., Єресько Г.О., Кимачинський С.І. //Харчова промисловість. – 2009. – №8. – С.52–56.

Особистий внесок дисертанта по п. 8: виконано експериментальні дослідження і отримано критеріальне рівняння для витрат енергії в роторно-вихровому емульсорі при виробництві сиркових мас.

9. Шинкарик М. М. Роторно-вихровий емульсор : Деклараційний патент на корисну модель №4117, 7а23С19/20 / Шинкарик М. М., Кимачинський С. І., Ворощук В. Я. // Промислова власність. – 2005. – № 1.

Особистий внесок дисертанта по п. 9: експериментальна апробація розробки, обговорення результатів, підготовка матеріалів до публікації.

10. Ворощук В. Я. Апаратурне оформлення технологічних процесів виробництва композиційних продуктів на основі сиру домашнього / Ворощук В. Я. // Тези доповідей третьої науково-технічної конференції ТДТУ "Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино- і приладобудуванні". – Тернопіль. – 1998. – С. 101.

Особистий внесок дисертанта по п. 10: аналітичний огляд наукових публікацій, формулювання висновків, підготовка матеріалів до публікації.

11. М. Шинкарик. Розробка експериментального стенду для дослідження процесів перемішування при виробництві композиційних продуктів на основі сиру домашнього / М. Шинкарик, В. Ворощук // Тези доповідей четвертої науково-технічної конференції ТДТУ "Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино- і приладобудуванні". – Тернопіль. – 2000. – С.159.

Особистий внесок дисертанта по п. 11: аналітичний огляд наукових публікацій, розробка експериментального стенду та методики проведення досліджень, формулювання висновків, підготовка матеріалів до публікації.

12. М. Шинкарик. Розробка експериментальної установки для дослідження виготовлення композиційних продуктів на основі молочного білку / М. Шинкарик, В. Ворощук // Матеріали сьомої науково-технічної конференції

ТДТУ "Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино- і приладобудуванні". – Тернопіль. – 2003. – С.184.

Особистий внесок дисертанта по п. 12: аналітичний огляд наукових публікацій, розробка експериментальної установки та методики проведення досліджень, формулювання висновків, підготовка матеріалів до публікації.

13. М. Шинкарик. Вплив механічної обробки на нагрів десертних сиркових мас у роторно-вихрових емульсорах. / М. Шинкарик, В. Ворощук // Матеріали восьмої науково-технічної конференції ТДТУ "Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино- і приладобудуванні" – Тернопіль. – 2004, – С. 135.

14. Ворощук В. Я. Особливості термічної обробки десертних сиркових мас у роторно-вихрових емульсорах / Ворощук В. Я. // 70-та наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів НУХТ. – 2004. – т. II. – С 29.

15. М. Шинкарик. Аналіз впливу роторно-вихрового пристрою на термічну обробку сирної маси в апаратах роторно-вихрового типу / М. Шинкарик, В. Ворощук // Матеріали дев'ятої науково-технічної конференції ТДТУ "Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино- і приладобудуванні". – Тернопіль. – 2005. – С. 140.

16. М. Шинкарик. Дослідження впливу механічної і теплової обробки на реологічні характеристики композиційних білкових продуктів на базі сиру домашнього при обробці в роторно-вихровому емульсорі / М. Шинкарик, В. Ворощук // Матеріали десятої науково-технічної конференції ТДТУ "Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино- і приладобудуванні". – Тернопіль. – 2006. – С. 194.

17. М. Шинкарик. Термічна обробка десертних сиркових мас в роторно-вихровому емульсорі / М. Шинкарик, В. Ворощук // 73-тя наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів НУХТ. – 2007. – частина II. – С. 148.

18. Шинкарик М. М. Інтенсифікація технологічного процесу виробництва композиційних білкових продуктів при застосуванні вакууму / Шинкарик М. М., Кимачинський С. І., Ворощук В. Я. // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції "Інноваційні технології проблеми якості і безпеки сировини та готової продукції у м'ясній та молочної промисловості. – НУХТ. – Київ. – 2007. – С.36-37.

19. М. Шинкарик. Особливості механічної обробки десертних сиркових мас у роторно-вихрових емульсорах / М. Шинкарик, В. Ворощук // Матеріали одинадцятої науково-технічної конференції ТДТУ "Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино- і приладобудуванні". – Тернопіль. – 2007, С. 188.

20. М. Шинкарик. Визначення потужності для приводу роторно-вихрових емульсорів / М. Шинкарик, В. Ворощук // 74-тя наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів. – НУХТ. – 2008. – частина II. – С. 382.

21. М. Шинкарик. Особливості затрат потужності в парі ротор-статор в роторно-вихрових емульсорах при виробництві композиційних продуктів на базі сиру домашнього / М. Шинкарик, В. Ворощук // Матеріали дванадцятої науково-технічної конференції ТДТУ "Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино- і приладобудуванні". – Тернопіль. – 2008. – С.235.

Особистий внесок дисертанта по п.п. 13...21: аналітичний огляд наукових публікацій, отримання експериментальних даних та їх обробка, формулювання висновків, підготовка матеріалів до публікації.

22. М. Шинкарик. Методика визначення витраченої на перемішування потужності в місткостях роторно-вихрових емульсорів / М. Шинкарик, В. Ворощук // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції ТДТУ. – Тернопіль. – 2009. – С.278.

Особистий внесок дисертанта по п. 22: аналітичний огляд наукових публікацій, розробка методики визначення потужності, формулювання висновків, підготовка матеріалів до публікації.

АНОТАЦІЯ

Ворощук В.Я. Гідродинамічні процеси обробки сиркових мас в роторно-вихровому емульсорі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Національний університет харчових технологій Міністерства освіти і науки України, Київ, 2010.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню гідродинамічних процесів у роторно-вихрових емульсорах, що проходять в сиркових масах зі структуроутворювачами в процесі їх механічної і теплової обробки і розробці методики гідродинамічного та технологічного розрахунку емульсора.

Представлені результати досліджень основних реологічних характеристик (ефективна в'язкість, граничне напруження зсуву, темп руйнування структури) в процесі теплової, механічної і сумісної термомеханічної обробки. Подані відповідні математичні співвідношення. Представлені результати досліджень залежності використаної потужності від реологічних характеристик. Зроблено висновки про доцільність поступового внесення твердої фази. Проведені дослідження показали, що за таких умов можна досягнути 20% економії механічної енергії.

Вивчено вплив на витрати потужності параметрів роботи роторно-вихрового пристрою емульсора. Встановлено, що оптимальне число обертів ротора коливається в межах $2750 < n < 3250$ об/хв.

Для оцінки механічної обробки сиркової маси запропоновано використовувати показник механічної обробки. Розроблено методику гідродинамічного і технологічного розрахунку роторно-вихрового емульсора.

Результати дисертації впроваджено в Технологічному інституті молока і м'яса Національної академії аграрних наук України (акт впровадження № 12 від 4.01.2010 р.). Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів наукового дослідження у виробництво складає 197 тис. грн.

Ключові слова: роторно-вихровий емульсор, витрати потужності, в'язкість, реологічні характеристики, швидкість зсуву, градієнт швидкості, гідродинамічні і технологічні розрахунки.

АНОТАЦИЯ

Ворощук В.Я. Гидродинамические процессы обработки сырковых масс в роторно-вихревом эмульсоре. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – Процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. – Национальный университет пищевых технологий Министерства образования и науки Украины, Киев, 2010.

Кандидатская работа посвящена исследованию гидродинамических процессов в роторно-вихревых эмульсорах, происходящих в сырковых массах со структурообразователями в процессе их механической и тепловой обработки и разработке методики гидродинамического и технологического расчета эмульсора.

В диссертации проведен анализ реологических характеристик сырковых масс и выбрана модельная масса за комплексным коэффициентом состава K , предложенным А. В. Горбатовим. По результатам анализа имеющихся литературных источников сделан вывод о том, что для обработки сырковых масс эффективным является оборудование с циркуляционным контуром и роторно-вихревым устройством (около 0,09 кВт/кг против 0,11 кВт/кг продукта в емкостных аппаратах типа “Штефан”). Среди аппаратов такого типа выделен роторно-вихревой эмульсор разработки Технологического института молока и мяса Национальной академии аграрных наук Украины.

Представлены результаты исследований основных реологических характеристик (эффективная вязкость, предельное напряжение сдвига, темп разрушения структуры) в процессе тепловой, механической и совместной термомеханической обработки. Поданы соответствующие математические формулы. Представлены результаты исследований зависимости использованной мощности от реологических характеристик, в которых отмечено, что максимальное значение мощности наблюдается на начальном этапе периода обработки при максимальном значении напряжения сдвига для всех исследуемых чисел оборотов ротора. Сделаны выводы о целесообразности постепенного внесения твердой фазы. Проведенные исследования показали, что в таких условиях можно достичь около 20% экономии механической энергии.

Изучено влияние параметров работы ротора на расход мощности. Установлено, что при увеличении числа оборотов ротора затраты мощности, а именно при $n > 3500$ об/мин, увеличиваются в экспоненциальной зависимости, но производительность ротора при этом изменяется незначительно. Установлено, что оптимальное число оборотов ротора находится в пределах $2750 < n < 3250$ об/мин.

Для оценки механической обработки сырковой массы использован показатель механической обработки, являющийся отношением объема массы, обработанной достаточное количество раз, к общему объему массы.

Разработана методика гидродинамического и технологического расчета роторно-вихревого эмульсора.

Результаты диссертации внедрены в Технологическом институте молока и мяса Национальной академии аграрных наук Украины (акт внедрения № 12 от 4.01.2010). Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов научных исследований в производство составляет 197 тыс. грн.

Ключевые слова: роторно-вихревой эмульсор, расход мощности, вязкость, реологические характеристики, скорость сдвига, градиент скорости, гидродинамические и технологические расчеты.

ANNOTATION

Voroshchuk V.Y. Hydrodynamic processes of processing the sweet creamed curds in rotor-vortex emulsifier. – Manuscript.

Thesis for the Scholarly Degree of Candidate of Technical Sciences in Specialty 05.18.12 – Processes and equipment for food, microbiological and pharmaceutical productions. – National University of Food Technologies of Ukraine Ministry of Education and Science, Kiev, 2010.

The thesis deals with the research of the hydro-dynamic processes in rotor-vortex emulsifiers occurred in sweet creamed curds with structural formation units within their mechanical and thermal processing and development of the methodology for the hydrodynamic and technological calculation of the emulsifier.

The paper provides the investigation results of the main rheological properties (the effective viscosity, ultimate offset voltage, structure destruction speed) within the process of thermal, mechanical and combined thermal-mechanical processing. The relevant mathematical relationships are provided. The investigation results of the applied power from the rheological properties are provided. The conclusions on the expediency to implement the gradual bringing of the hard phase in are made. The conducted investigations revealed that it is possible to reach savings in 20% for the mechanical energy consumption.

The influence at the expenses of power factors of rotor functioning is studied. It was established that at increase of rotor's turning number n , the power consumption would be increased. It was established that the optimal rotor's turning number would be within $2750 < n < 3250$ rot./min.

The way of evaluation the mechanical processing of sweet creamed curds under the factor of the mechanical processing was proposed.

The method of hydro-dynamic and technological calculation of rotor-vortex emulsifier is developed.

The results of the thesis are implemented in Technological Institute of milk and meat at Ukrainian National Agrarian Academy of Sciences (implementation act № 12 of 4.01.2010). The expected economic effect from the implementation of the results of research in production will amount 197 ths. UAH.

Key words: rotor-vortex emulsifier, power consumption, viscosity, rheological properties, offset speed, speed gradient, hydro-dynamic and technological calculations.