

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ

**Стадник І. Я., Піддубний В. А.,
Хареба О. В., Федорів В. М., Підгорний В. В.**

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОТОКИ ПРИ ФОРМУВАННІ БОРОШНЯНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ

Монографія

**Тернопіль
2021**

УДК 664.6/7
С 91

Автори:

Стадник І. Я., докт. техн. наук, професор;
Піддубний В. А., докт. тех. наук, професор;
Хареба О. В., докт. с.-г. наук, професор;
Федорів В. М., канд. тех. наук доцент;
Підгорний В. В. голова прфкому студентів НУХТ.

Рецензенти:

В. Г. Юкало, докт. біол. наук, професор;
А. І. Соколенко, докт. техн. наук, професор.

Схвалено та рекомендовано до друку на засіданні вченої ради
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.
Протокол №5 від 23 березня 2021 р.

Схвалено та рекомендовано до друку на засіданні Бюро Відділення аграрної економіки і
продовольства НААН від 2 квітня 2021 р.

С 91 Сучасні технології та енергетичні потоки при формуванні борошняних
напівфабрикатів: монографія / Стадник І.Я., Піддубний В.А., Федорів В.М., Хареба О.В.
Підгородний В.В. Тернопіль : Ви-тво ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 372с.

ISBN 978-966-305-113-0

УДК 664.6/7

Розширено розглянуто основи теорії, спрямовані на інтенсифікацію процесу. Викладено сучасні уявлення про формування борошняних виробів. Проаналізовано основні конструктивні, технологічні та фізико-хімічні аспекти й принципи формування борошняних виробів. Розглянуто вплив конструкції робочого органу, робочої камери, сировини на динамічні характеристики регулювання процесів тіста. Подано матеріал інноваційних технологій безглютенових напівфабрикатів.

Запропоновано розроблення у формувальних машинах нових поверхонь робочих органів, функціональні можливості яких дозволяють суттєво розширити область їх застосування й створити нові методи регулювання їхньої структури та властивостей. Показано, що створення нового принципу формування забезпечує високий ступінь конструктивно-технологічного забезпечення процесів в умовах впливу різних зовнішніх факторів. Обґрунтовано енергетичні аспекти, які впливають на зниження енергоємності за допомогою величини деформації зрушення й питомої роботи. Наведено основні технічні характеристики, конструктивні особливості і режими роботи машини. Подано практичні рекомендації шляхів розрахунку нових робочих органів, використання тридаційної сировини. Запропоновано методи та обґрунтування отриманих результатів з результатами експериментальних досліджень. Розроблено принцип проектування й моделювання інженерного розрахунку даного класу машин.

Призначено для науковців, інженерно-технічних працівників, які займаються створенням, модернізацією та експлуатацією формувальних, тістомісильних машин у хлібопекарській, кондитерській та інших галузях промисловості. Може бути корисною для аспірантів, магістрів та студентів відповідних спеціальностей.

©Стадник І.Я., Піддубний В.А., Хареба О.В.,
Федорів В.М., Підгорний В. В. 2021
© Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя, 2021

ISBN 978-966-305-113-0

ЗМІСТ

Передмова	7
Вступ	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МАШИН З ВАЛКОВИМИ РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ ТА ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ ЇХ РОБОТИ	12
1.1. Підходи до фундаментальних взаємозв'язків механізмів та технологій при дії валкових робочих органів	12
1.1.1. Огляд та оцінка взаємодії обертових валків та тіста	18
1.1.2. Аналіз чинників впливу валків на середовище	21
1.2. Основні напрямки та шляхи ефективного нагнітання тіста	25
1.3. Основні підходи до параметрів процесу розкачування тіста	29
1.4. Основні підходи до параметрів процесу розкачування тіста	34
1.5. Огляд існуючих моделей і принципи моделювання розкачування тіста	41
Висновки до першого розділу	43
Список використаної літератури	44
РОЗДІЛ 2. РЕОЛОГІЯ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ.....	47
2.1. Аналіз моделей неньютонівських рідин	48
2.1.1. Зв'язок конструктивних параметрів машини з реологічними особливостями середовища	54
2.1.2. Обґрунтування параметрів, що відбуваються в робочих камерах машин з валковими робочими органами	60
2.2. Моделювання руху рідин, як спосіб обґрунтування дії робочих органів	64
2.2.1. Реологічні властивості тіста, що визначають вимоги до геометрії валків	65
2.2.2. Механічні властивості вибродженого тіста при деформації	68
2.3. Реологічна модель нагнітання тіста валками з прямими пазами	70
2.4. Реологічна модель нагнітання тіста валками з гвинтовими пазами	74
2.5. Адгезія, основні поняття та визначення	84
2.5.1. Підходи до визначення адгезії	86
2.5.2. Вплив адгезії тіста на процес нагнітання	90
2.6. Обчислення міцності адгезії	102
2.6.1. Методика визначення міцністю адгезії	109

2.6.2. Аналітична модель визначення адгезії середовища при нагнітанні ...	111
2.7. Методи дослідження.....	121
2.7.1. Методи досліджень шорсткості поверхні	123
2.7.2. Визначення параметрів напружено-деформованого тіста	125
Висновки до другого розділу	130
Список використаної літератури	131
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ЗОВНІШНІХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВПЛИВІВ ТА ТРАНСФОРМАЦІЯ СИРОВИННИХ ПОТОКІВ.....	134
3.1.Обґрунтування основних енергетичних впливів на параметри потоку середовища	134
3.1.1. Встановлення впливу конструктивних параметрів на середовище шляхом прогнозування об'єму можливої його течії	135
3.2. Прогнозування можливої течії середовища за їх розмірами	138
3.3. Визначення течії тіста у шпарині між обертовими валками	144
3.4. Трансформації сировинних потоків	147
3.4.1. Фізичне підґрунтя в оцінці потенціалів розчинених газів	150
3.4.2. Гідродинамічні параметри та інтенсифікація масообмінних процесів в газорідних середовищах	154
3.5. Огляд та аналіз технологічного обладнання для вирощування мікроорганізмів	177
3.6. Особливості гідродинаміки і масообміну в газорідних середовищах в умовах енергетичних збурень	183
3.7. Особливості зброджування середовищ при виробництві бубликів	199
Висновки до третього розділу	211
Список використаної літератури	213
РОЗДІЛ 4. ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ, ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ДЕФОРМАЦІЮ ТІСТА ПРИ НАГНІТАННІ.....	214
4.1.2. Методологія прогнозування процесів нагнітання і розкачування	216
4.2. Динаміки міжфазової взаємодії в тісті при деформації	218
4.2.1. Особливості зброджування цукровмісткого тіста в технології виробництва бубликів	222
4.2.2. Визначення геометричних параметрів вузла нагнітання тіста	227
4.3. Взаємозв'язок чинників при дії валкових робочих органів	228

4.3.1. Оцінка ефективності деформації тіста валками	235
4.4. Класифікаційні ознаки способів і засобів подачі тіста у формувальній машині	240
4.4.1. Методика визначення параметрів середовища на поверхні валків	247
4.4.2. Розрахункова модель поведінки тіста у пазах формової поверхні валків	250
4.5. Структурно-технологічні властивості тіста в процесі деформації	257
4.5.1. Аналізі динаміки утворення структури тіста бублика	260
Висновки до четвертого розділу	264
Список використаної літератури	264
РОЗДІЛ 5. МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕКСТРУДОВАНОГО КУКУРУДЗЯНОГО БОРОШНА В ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА БУБЛИКІВ ОЗДОРОВЧОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	267
5.1. Основні правила виробництва кондитерських виробів в промисловості	269
5.2. Аналіз особливостей технологічних взаємозв'язків при формуванні напівфабрикату	274
5.2.1. Дослідження функціонально-технологічних властивостей модифікованої зернової сировини	278
5.2.2. Особливості технології виготовлення безглютенових напівфабрикатів	285
5.3. Методи дослідження.....	288
5.4. Теоретичне обґрунтування використання екструдованого кукурудзяного борошна в технології нагнітання	293
5.4.1. Порівняльний аналіз хімічного складу пшеничного та екструдованого кукурудзяного борошна	295
5.4.2. Порівняння амінокислотного складу пшеничного борошна вищого гатунку та ЕКБ	296
5.4.2.1. Вивчення впливу ЕКБ на властивості крохмалю борошняних сумішей	297
5.5. Вплив поверхні валків на процес отримання напівфабрикату з використанням ЕКБ	301
5.6. Дослідження механічних характеристик тістових напівфабрикатів при формуванні	305

5.6.1. Механічні властивості тіста з використанням екструдованого кукурудзяного борошна	306
5.7. Моделювання виробництва напівфабрикатів з використанням екструдованого кукурудзяного борошна	310
Висновки до розділу 5	313
Список використаної літератури	314
РОЗДІЛ 6. МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РІЗНОЇ СИРОВИНИ В ТЕХНОЛОГІЇ ОЗДОБЛЮВАЛЬНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ ОЗДОРОВЧОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	316
6.1. Основи виробництва напівфабрикатів із сировини рослинного походження	316
6.2. Аналітичний аналіз досліджень по використанню рослинної сировини в приготуванні бобових паст	319
6.3. Аналітичний аналіз досліджень по використанню рослинної сировини в приготуванні марципанових паст	323
6.4. Матеріали та методи дослідження	327
6.5. Наукові гіпотези	337
6.6. Результати досліджень марципанових паст	340
6.7. Результати досліджень бобових паст	353
Висновки до шостого розділу	360
Список використаної літератури	360
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	364
ДОДАТКИ	367

ПЕРЕДМОВА

Дослідження в області формування виробів із тіста, проведених за час виходу другого видання, дозволило одержати нові дані, що мають суттєве значення для теорії і практики з використання замішаного тіста. Виявлені закономірності, що характеризують зміни властивостей тіста при використанні нових конструктивних та технологічних параметрів. Значно розширились відомості про вивчені деформаційні впливи на якість тіста при його формуванні. Розроблено і знаходяться в стадії впровадження ряд нових методів і приладів для автоматичного контролю параметрів вибродженого тіста.

Узагальнення всіх попередніх даних з ціллю одержання більш розширеного напрямку змін тіста при дії деформації тиску, зсуву, кручення, витікання із насадок, вплив компонентів та температури, що забезпечує одержання високоякісного тіста та виробів, і стало задачею третього узагальненого видання монографії. Враховуючи зростаючі вимоги до борошняних виробів при використанні вітчизняної сировини, необхідно було обґрунтовано проаналізувати сучасне представлення та запропонувати нове бачення теорії інноваційного змішування компонентів для тіста і паст із використанням безглютенової сировини й формування даних виробів.

Необхідно зауважити, що не всі важливі вимоги до теорії і практики замішування та формування виробів із борошняної сировини одержали обґрунтовані пояснення. Цілий ряд моментів проходження структурних змін утворюючого середовища та вплив геометричних параметрів в робочій камері формувальної машини, вимагає доповнення досліджень та вивчення. В даному випадку автори на основі своїх проведених теоретичних та натурних досліджень розкривають інноваційний напрямок технологічних процесів виробництва напівфабрикатів із використанням нетрадиційної сировини. В повному обсязі подано матеріал енергетичних потоків та їх вплив на проходження процесу з відповідними схемами та припущеннями. Є ще ряд нових проблем, які потрібно у подальшому дослідити.

Тому даний матеріал дасть поштовх до подальшого наукового підходу в даному напрямку. В деяких випадках є необхідність змінити напрям роботи по удосконаленню робочих параметрів процесу та обладнання, так як їх проведення буде сприяти подальшому технічному прогресу створення такого класу машин.

Намічено також ряд інших задач, напрямків дослідження, рішення яких дозволить в майбутньому повністю вести контроль процесу та одержання якісних борошняних виробів.

ВСТУП

Однією з складних проблем розвитку економіки України є забезпечення потреб в паливно-енергетичних ресурсах та зниження енергоспоживання на одиницю виробленої продукції. Більше 20 років в Україні формуються програми використання нетрадиційних енергетичних ресурсів, до яких відносять сонячну і вітроенергетику, органічні залишки переробки сільськогосподарських культур, пошук сланцевого газу. Енергозберігаючий напрямок розвитку харчових технологій передбачає зниження витрат електроенергії на всіх стадіях її споживання, що забезпечує вдосконалення структури енергобалансу.

Більшість процесів в харчовій та переробній промисловості пов'язано з переробкою дисперсних систем, суспензій, колоїдних розчинів, різних в'язко – пластичних матеріалів. Переробна сировина на даних підприємствах та готова продукція володіє дуже різними видними фізико-механічних та реологічних властивостями. Процеси по переробці харчових продуктів відрізняються від процесів в інших виробництвах своєю складністю та своєрідністю.

Історія існування та розвитку окремої людини, суспільств і держав абсолютно пов'язана з можливостями технологій, задіяних в безперервному синтезі продукції харчування. Навіть в сучасному світі раптово обірваний ланцюг вказаного синтезу дозволив би проіснувати населенню лише близько 40 діб.

Узагальнений тисячоліттями досвід різних поколінь свідчить також про надзвичайно високий рівень стійкості в програмах розвитку і існування представників мікроорганізмів, тваринного та рослинного світу.

Очевидно, що з цієї точки зору значення має глибина переробки вхідного потоку сировини, а з точки зору інтересів людини бажаним є наближення співвідношень енергетичних потенціалів продукції на виході і сировинних потоків на вході до одиниці. Проте, це не єдиний показник, оскільки високим критерієм всякої технології є питомі енергетичні витрати на їх здійснення у формі первинних енергетичних джерел. Використання різних форм енергій забезпечує відповідну задану трансформацію матеріальних потоків.

Використання кожного процесу в таких трансформаціях потребує відповідного енергетичного забезпечення, що означає зростання загальної енергії системи. На ці енергетичні витрати накладаються зовнішні енерговитрати, які пов'язані з необхідністю стабілізації показників термодинамічних параметрів систем. До їх числа відноситься температура,

показники газового середовища зі співвідношенням кисню та діоксиду вуглецю, вологість повітря, що подається на аерацію тощо. Наявність зон теплової обробки з відмінними показниками температур або навіть з фазовими переходами відповідають випадкам, коли доцільним стає створення замкнених локальних зон енергокористування. В такій системі вторинний енергетичний ресурс відповідно трансформується і повторно використовується.

За останні роки харчова промисловість почала розвиватися прискореними темпами на базі удосконалення технології та оснащення підприємств сучасним високопродуктивним обладнанням, що частково завозиться із-за кордону.

У наш час наука являє собою рушійну силу будь-якої сфери людської діяльності, і у першу чергу це стосується виробництва. Розробка нових напрямків при проектуванні процесів харчових та переробних виробництв та обладнання для їх проведення обумовлюється розвитком теорії та практики таких напрямків, як моделювання, оптимізація, технічна кібернетика та промислова кінетика. Ці методи, які постійно піддаються експериментальній перевірці, протягом десятиліть демонстрували свою надійність та ефективність.

Сучасні комп'ютерні інструментальні середовища дозволяють також здійснювати складні розрахунки і доводити їх до числових, або графічних наочних результатів в багатьох задачах, які раніше вважалися надто складними для отримання остаточних результатів.

Однак, експлуатація технологічного устаткування в жорстких умовах, зокрема – робота механізмів під впливом агресивних середовищ, при знакозмінних навантаженнях і високих температурах, зумовлює підвищення вимог до їх експлуатаційних характеристик. При вдосконаленні конструкцій машин потрібно ретельно дослідити особливості процесів і забезпечити дотримання оптимальних параметрів у робочих камерах, а також враховувати конструкції робочих органів, вплив яких має відповідати основним вимогам теорії замішування, але не обмежувати творчої ініціативи винахідників.

Найбільш економічним є використання машин серійних випусків. Пошук і перевірка інших варіантів конструктивного оформлення доцільні, коли серійні машини не можна використовувати через невідповідність матеріального виконання, робочих меж температури і тиску або через не достатньо високу інтенсивність замішування. У цих випадках конструювання машини не є єдиним виходом, нерідко раціональними виявляються зміни до технологічного процесу, зміни об'єму камери, робочого органу та ін.

Розрахунок машини та процесу дозволяє обґрунтовано виконати обчислення по визначенню найбільш економічних варіантів (ціна машини, що

випускають серійно, вартість її експлуатації, маси і потужності приводу), а також конструктивних і технологічних факторів. Визначення полягає у характеристиці поля концентрації і температури, теплового потоку, виходу продукту замішування його формування у відповідності до розрахункових величин, вимогам технології.

Функціональні можливості машин дозволяють суттєво розширити область їх застосування і створити нові методи регулювання їхньої структури та властивостей. Виходячи з цього, створення машин потребує глибокого вивчення механізму конструктивно-технологічного забезпечення процесів в умовах впливу різних зовнішніх факторів.

При розробці або модернізації машин можливі різні напрямки дослідження змін середовища, що контролюється в робочій камері. Запропонована схема комплексу досліджень має за мету розкрити можливі фактори оптимізації процесу в робочій камері машини та уточнити особливості процесу в цілому. На основі запропонованої схеми в роботі розглянуто шляхи та методи визначення якості тіста та напрямки його удосконалення. Значна частина роботи присвячена розкриттю стадійності проходження змін в замішаному тісті під впливом деформації, математичному моделюванню процесу та розробленню методик визначення його якості.

З числа досліджень довелося включити такі, що потребують розгляду теорії з проведенням і підбиранням реакції до принципів теоретичних положень. Під час проведення досліджень використовували вітчизняні та зарубіжні літературні джерела. Разом з описом нових досліджуваних робіт містяться і давно відомі. Деякі серії запропонованих досліджень демонструвалися і обговорювалися на міжнародних конференціях та у публікаціях в журналах (скорус), це пов'язано з необхідністю якомога ширшим і повнішим розкриванням ролі удосконалення робочих органів для виробництва бубличної продукції. Два розділи присвячені інноваційним технологіям при виробництві безглютенових напівфабрикатів. Дані матеріали були опубліковані в міжнародних журналах і їх результати викликали досить бурхливе обговорення та наданням пропозицій.

Велика увага спрямована на енергетичні потоки. Тому за доцільне у монографії наведено необхідні короткі пояснення природи тих явищ, що спостерігалися під час проведення дослідів. Вибраний матеріал монографії спрямований дати перевірені дослідження, що цікавлять сучасного фахівця харчових виробництв.

Матеріал викладено з урахуванням Міжнародної системи одиниць Si, Єдиних систем конструкторської і технологічної документації (ЄСКД і ЄСТД), принципів систем гарантування безпеки харчових продуктів HACCP, міжнародних стандартів серії ISO 22000: 2005, ISO TS 22003 «Системи менеджменту для організацій, які здійснюють аудит і сертифікацію систем управління харчовою безпекою», ISO TS 22004 «Системи менеджменту харчової безпеки: настанови із застосування ISO 22000: 2005, ISO 22005 «Простежуваність у виробництві харчових продуктів і кормів.

Монографія є результатом колективної праці, де автори виконали такі розділи: вступ, розділи 2,3 (В. А. Піддубний), розділи 1,5 (О. В. Хареба), розділ 4,5 (В. М. Федорів) 4 розділ (В. В. підгорний) розділи 6,7 і загальна редакція (І. Я. Стадник).

На основі викладеного, як і попередній монографії, хочеться висловити думку словами відомого на тернопіллі науковця, поета, фахівця у промисловості виробництва продукції, професора Володимира Вихруща:

*Як є мета, то є і сила
І мрія наче ті вітрила.
Який характер, така доля,
А фах людини – її крила.*

*Великі справи чи малі –
Не відривайся від землі,
Роби все так, як роблять люди:
Вони – твої учителі.*

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МАШИН З ВАЛКОВИМИ РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ ТА ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ ЇХ РОБОТИ

У даному розділі висвітлено дії робочих органів на в'язке середовище різного класу машин, поведінку даного середовища, перспективи розвитку ринку їх конструювання. Розкрито основну суть впливу поверхні робочих органів на структурно-механічні властивості в'язких рідин, що в кінцевому визначає хід технологічного процесу. Розглянуто теоретичні основи стану в'язких рідин в технології формування, визначено перспективи використання валкових робочих органів при нагнітанні, розкачуванні, транспортуванні в машинах різного класу. Проведено підходи до фундаментальних досліджень встановлення взаємозв'язків механізмів та технологій впливу валків на середовище.

1.1. Підходи до фундаментальних взаємозв'язків механізмів та технологій при дії валкових робочих органів

Сучасні ринкові умови ставлять перед виробниками продуктів харчування завдання впровадження конкурентоспроможних технологій та обладнання за умов одночасного ефективного впливу на оброблювальний матеріал та покращення споживчих властивостей, підвищення харчової цінності при менших енерговитратах.

Валкові машини є одним з основних типів устаткування в переробній промисловості. До валкових машин відносяться формувальні, змішувальні, розкатувальні. Крім цього, валки використовують для проведення процесів змішування, гомогенізації компонентів суміші, пластикації, дроблення, перетирання і інших технологічних операцій. Каландри застосовуються для отримання листів і плівок. По характеру взаємодії оброблюваного середовища з валками процеси переробки в значній мірі аналогічні.

Необхідною умовою зтягування суміші в простір між валками є те, щоб кут захоплення був меншим або, принаймні, рівним куту тертя середовища до поверхні валка. Сьогодні існує три групи методів математичного опису періодичного процесу обробки середовища на машинах з валковими робочими органами. До першої групи відноситься метод, що базується на виведенні емпіричних залежностей. Залежності одержані на основі обробки

експериментальних даних за допомогою теорії подібності і аналізу розмірностей та рівнянь. Так, використовуючи цей метод, Н. А. Козулін, Н. И. Таганов і М. Ф. Михалев вивели емпіричну залежність для визначення зусилля розпору і потужності приводу валків.

До другої групи відноситься метод, побудований на припущенні, що полімерні матеріали виражені межею текучості. Сам процес деформації полімерних матеріалів аналогічний прокатування металу. На підставі даного припущення М. М. Майзелем використано диференціальне рівняння рівноваги елемента в зоні деформації полімеру.

До третьої групи – відноситься теорія, в основі якої лежить уявлення про те, що полімерні матеріали в процесі переробки поведуться як рідини. Процес течії може описатися рівнянням гідромеханіки. Ця теорія одержала назву гідромеханічної.

Всі розроблені до теперішнього часу гідромеханічні методи розрахунку основних параметрів процесу періодичної дії валків на середовище засновані на наближеному рішенні задачі ламінарної течії. Течія розглядається нестискуваною в'язкою або вязкопружною між двома циліндровими валками, що обертаються.

Не дивлячись на порівняно велику кількість гідромеханічних методів, що описують процес обробки полімерного матеріалу між валками, загальними допущеннями, що приймаються в них для спрощення задачі, є наступні:

- 1) рух рідини вважається сталим і плоскопаралельним;
- 2) швидкість руху матеріалу у напрямі осі x значно переверщує швидкість руху
- 3) у напрямі осі y ;
- 4) матеріал приймається нестискуваним, і виникаючі дотичні напрути значно перевершують нормальні;
- 5) рух рідини приймається ізотермічним, отже, рівняння енергії не розглядається;
- б) масовими силами, зважаючи на їх невеликі значення, нехтуємо.

Основною відмінністю одного гідромеханічного методу від іншого є прийняття різних реологічних рівнянь, що описують поведінку матеріалу при деформації і різних граничних умов проведення процесу.

Проте, існує потреба в розробці або модернізації існуючих машин з валковими робочими органами, що забезпечуватимуть формування виробу із заданими реологічними характеристиками, толерантністю до коливань

технологічних параметрів, за рахунок стійкості механічних впливів конвективних особливостей валків.

Комплексне вирішення питання інформаційного забезпечення механізмів та технологій виготовлення бубликової продукції потребує виявлення всієї необхідної сукупності інформаційних зв'язків. Для цього будується інформаційна модель процесу за наступними базовими принципами: чітке формулювання мети; єдиний суб'єкт моделювання; наявність єдиної точки зору. На основі отриманої такої моделі та структури майбутньої системи, необхідно перейти до оформлення процесу перетворення даних у інформацію. Для цього розроблено велику кількість методів, механізмів і технологій (локальні і централізовані бази даних, системи зв'язаних ієрархічних управлінських процедур). Найбільш вживану та перспективну групу складають статистичні методи, які умовно розподіляються на прості (сенсі використання та розуміння) та методи математичної статистики, які остаточно набули статусу прикладного розділу математики, що пов'язано із:

- ускладненням технологій, у зв'язку з чим суттєво зросла кількість контрольованих параметрів, їх мінливість і взаємообумовленість;
- зростанням вимог до якості формування та виробництва бубличних виробів і функціонування потокової лінії на підприємстві;
- поширення програмних комплексів у комп'ютерних технологіях, що значно спрощує акумулювання, обробку та оформлення великої кількості інформації;
- змінами у сутності технологій розкачування, нагнітання та обладнання для формування напівфабрикату;
- перетворення інформації, що висуває на передній план вимогу ефективної обробки і аналізу потоку для фізичного моделювання.

При всьому різноманітті методів, механізмів та технологій, при всій визначеності загальних принципів та цілей, покращення якості є головним принципом успіху їх втілення, успішного функціонування та безперервного розвитку і вдосконалення. В кондитерській та хлібопекарській промисловостях одним із впливових засобів скорочення тривалості процесу виробництва бубличних виробів, покращення їх якості і зменшення технологічних затрат борошна, являється механічна обробка, транспортування, стиснення, нагнітання тіста дією валків при формуванні, що підтверджується багаточисельними дослідженнями наших і закордонних вчених. Одночасно з цим, впровадження способу використання валків для вище згаданих технологічних операцій в практиці промисловості у деякій мірі сповільнюється. Це підтверджується

відсутністю новачійних валкових машин, що забезпечують раціонально-технологічну дію на тісто.

Недостатність інформації по існуючим прикладним дослідженням процесу і відсутність досліджень взаємозалежності параметрів машини від іншого технологічного обладнання потокової лінії, спонукало на невдалу багаточисельну спробу створення машин методом модернізації існуючих, так і копіюванням окремих закордонних зразків. Проведений інформаційний аналіз і порівняльна оцінка різних схем машин і способів формування тіста по відношенню до простоти і можливостей їх машинно-апаратного оформлення створює різні можливості, напрямки по виявленню і встановленню факторів, які визначають раціональність застосування різних способів і схем оформлення машин різних типів. В матеріалах присвяченим апаратного оформлення процесу практично не висвітлені питання вибору схем машин, раціонального конструктивного оформлення робочих органів і вибору оптимальних швидкостей їх руху.

У сформованій ситуації підприємства кондитерської та хлібопекарської галузі випробовували (і випробовують) необхідність у сучасній машині з валковими робочими органами вітчизняного виробництва, що при оптимальній вартості, повинна забезпечувати:

- інтенсивне розкачування, нагнітання;
- можливість роботи з тістом вологістю 30–35%;
- можливість встановлення в існуючі на підприємствах технологічні схеми;
- простоту обслуговування;
- надійність роботи.

Тому розроблення вітчизняних технологій конкурентоспроможних бубличних виробів і рекомендацій щодо створення обладнання для їх механізованого виробництва є актуальними для галузей.

Технологічні параметри виробництва бубликової продукції взаємозв'язані із структурно-механічними властивостями напівфабрикатів і, відповідно, впливають на їх рецептурний склад та технологію формування, тобто характеризуються з окремих, головним чином, послідовних операцій. Ефект кожної операції визначається не лише власне даною операцією, але є результатом впливу на весь технологічний процес. Тобто вихідні параметри впливатимуть на технологічну схему процесу і матимуть дві або три центральні інформаційні підсистеми: затягування валками напівфабрикатів, його стискання, розкачування та нагнітання у формувальний пристрій.

Для недопущення не якісного розкачування, нагнітання тіста та отримання виробів задовільної якості, винахідники спрямовують розробки на те, щоб можна було регулювати перебіг технологічних процесів у робочій камері машини. Сюди можна віднести конструктивні та технологічні параметри: форма робочого органу та його поверхня, форма робочої камери; тривалість дії валків, температура, вологість, частота їх обертання.

Від формування кінцевого результату залежить вибір подальшого напрямку пошуків, і отже, це один із творчих етапів, що визначає успіх усього рішення. Формування ідеального результату містить бажані властивості, функції, дії (результату) за яким-небудь елементом. Шляхом визначення конструкції робочої камери та робочого органу, що найбільшою мірою піддаються змінам, і приписуючи бажаний результат, – таке формулювання ідеального результату значно звужує напрямок подальшого пошуку й обмежує конструктивні зміни.

Сьогодні немає достатньо задовільної системної теорії, яка безпосередньо впливала із основних рівнянь гідродинаміки. Перебіг основних деформаційних процесів при нагнітанні є серйозним фактором, що ускладнює прогнозування результатів технологічної системи. Якщо у ролі пошуку елемента завжди брати «зовнішнє середовище», то поле пошуку розширюється, і серед варіантів рішення задачі залишаються не тільки конструктивні, але й технологічні рішення, пов'язані зі зміною значення одного із властивостей (параметрів) елементів системи.

При створенні нових технічних рішень (системи) завжди виникають проблеми пошуку нових, більш ефективних конструктивно-технологічних рішень, і насамперед таких, які переважають рівень існуючих. Для того щоб з'ясувати, у чому й наскільки варто міняти існуючу систему валкового нагнітання, потрібно проаналізувати та оцінити можливий інтервал зміни кожної властивості. Така оцінка може відбутися за допомогою характеристик потенційних змін, властивостей елементів системи. Крім того, аналіз властивостей елементів сприяє розвитку уявлень про встановлення межі зміни їх значень. Таким чином можна побачити щось загальне, провести між ними аналіз.

Технічне вирішення удосконалення системного підходу валкової деформації сьогодні не вирішене за допомогою традиційних, стандартних інженерно-конструкторських прийомів. Рішення підлягає переводу в клас науково-технічних (винахідницьких) задач у наступній обробці:

- формулюванню умов процесу й пошуку ідеї її вирішення. Значення формулювання ідеального кінцевого результату полягає в тому, щоб одержати орієнтир для руху до технічних рішень високого рівня. Для цього застосовують наступні принципи досягнення ідеальності технічної системи стадійності процесу нагнітання тіста у вузлі формувальної машини:

- у кожний момент часу й у кожній точці простору в процесі нагнітання, розкачування, транспортування повинні бути тільки ті властивості й взаємодії, які необхідні для одержання корисного результату;

- необхідно максимально використовувати наявні властивості гетерогенної системи й взаємодії її елементів з конструктивними елементами вузла, усувати втрати й відходи;

- необхідно доводити до мінімуму витрати часу на одержання якісного процесу.

При конкретизації удосконалення вузла нагнітання формувальної машини обов'язково враховується взаємозв'язок багатьох властивостей елементів системи й взаємозумовленість їхніх значень. Вирішення науково-технічної задачі необхідно максимально наблизити до ідеального кінцевого результату, поліпшити показники якості, не погіршивши інші в подальшому технологічному процесі виробництва хлібобулочних та кондитерських виробів. Ідеальність вирішення досягається тим, що потрібний ефект можна досягати за рахунок використання впливу сусідніх систем – замішування тіста та його бродіння, дозування компонентів й їх впливом на основу нагнітання [1, 2, 3]. Тому основними принципами системного підходу до дослідження процесу є:

- підхід до усього процесу стадійності нагнітання валковими робочими органами як до цілої системи та її елементів;

- конкретизація системи процесу через утворювальні геометричні і технологічні зв'язки;

- утворення стійкого нагнітання тіста з подальшим технологічним процесом виробництва продукції, що характеризує його організацію;

- комплексний підхід до структурних зв'язків між конструктивними і технологічними параметрами;

- керування взаємодії тіста з валками за допомогою деформаційних зв'язків.

Цей підхід дозволяє упорядковано з рівноважним станом розкрити зв'язки між конструктивними та технологічними елементами системи дії валків на середовище. Їхня сумарна дія в рамках системи перевищує по своєму ефекту просте додавання ефектів дій кожної окремої стадії. Головне призначення

ефектів даної системи з'ясувати, які основні і допоміжні параметри можуть якісно і кількісно характеризувати роботу, фактори впливу на параметри системи і у чому полягає механізм їхнього впливу. Таким чином ми з'ясуємо основний принцип і механізм дії досліджуваної системи.

При дослідженні необхідно конкретно обґрунтувати, який параметр технічної системи може якісно і кількісно характеризувати, які причини цієї вади, які елементи системи пов'язані з його появою та зміною. Визначення і встановлення факторів, що діють на систему, і параметрів, що визначають її роботу, дозволяє дати характеристику вузла нагнітання формувальної машини.

Пристаючи до проектування і створення сучасної формувальної машини, з урахуванням викладених вимог, має бути прийнято ряд принципових рішень щодо її конструкції. Тому після ретельного аналізу кращих сучасних зразків, виходячи із сучасних принципів машинобудування, прогнозується створити нові валкові робочі органи різної конструкції для формувальних машин. Для цього потрібно передбачити, щоб вони володіли необхідними споживчими та конструктивними властивостями для роботи. Виконання цих умов є запорукою успішного функціонування механічних впливів нових поверхонь валків під час формування.

1.1.1. Огляд та оцінка взаємодії обертових валків та тіста

Впровадження нових технологій із використанням робочих органів залежить від ефективного впливу на тісто. Оцінювальною стороною є технологія виготовлення кондитерських борошняних та хлібобулочних виробів у своїй різноманітності, де критерій оцінювання є швидкість перебігу основних процесів.

Мікробіологічні процеси, що протікають в тістових напівфабрикатах мають потенційні можливості для контролю та регулювання. В свою чергу, це визначає можливість і доцільність розробки заходів по регулюванню біотехнологічних процесів у борошняних напівфабрикатах – процесів структуроутворення, гідратації, пептизації, бродіння.

Процеси, що відбуваються у вузлі нагнітання формувальної машини мають специфіку: вони здійснюються циклічно за порівняно короткий час, що обчислюється секундами. Складність процесів поділу та формування борошняного тіста зумовлена його властивостями: липкістю, пружністю та пластичністю. Основна відмінність тіста на початковій стадії його бродіння зумовлена капілярно-пористою структурою, в порах якого утримується

достатня кількість газоподібних продуктів бродіння. Тому при дії валків на тісто, воно втрачає значну частину газу, зменшується в об'ємі та ущільнюється.

Тому при аналізі враховуються лише ті процеси, які за час робочого циклу валків істотно впливають на властивості тіста або сам процес. Короткочасний вплив тиску з механічним переміщенням, переміщенням (течією) тіста в робочій камері, істотно впливають на структуру, фізико-механічні властивості тіста та характер наступних технологічних операцій. Вони є визначальними факторами при виборі параметрів даних машин.

В теперішній час майже весь асортимент кондитерських та хлібобулочних виробів виробляється дрібно штучний. Тому точність ділення при використанні валкових робочих органів має важливе значення. Допустиме відхилення, що встановлено по зважуванні 10 шт. виробів, від стандартної маси для виробів, що вистигли – 2.5%. Куски тіста різної маси потрапляючи в піч, пропікаються неоднаково, що негативно відбивається на výroбах. Тому машини даного класу повинні працювати з точністю 1.5...2% при виготовленні дрібно – штучних виробів, а при виробництві виробів по масі – в межах 5...6% [7, 16].

У своїх дослідженнях Полевич В. В. охарактеризував проблеми, що виникають під час переробки харчової сировини. Також Плахотін В. Я., Тюкова І. С., Хомич Г. П. розкрили особливості продуктів харчового виробництва, їх класифікацію, характеристики на основі закономірності. Базою для технологій являються фундаментальні науки та принципи побудови технологічних процесів.

Значний вклад у динаміку руху середовища зробили професор Лісовенко О. Т. та Стадник І. Я. [7, 16]. Ними розкрито зв'язок робочого органа з особливостями його впливу на оброблене середовище. Вони пов'язали вплив робочих органів на якість тістоутворення, зв'язок технічних можливостей машин з якісними характеристиками перебігу процесів у робочих камерах.

Не дивлячись на відносно високий загальний рівень механізації, ряд технологічних операцій здійснюються недосконалими машинами, що стримує продуктивність поточкових ліній. В першу чергу це відноситься до валкових нагнітачів тіста, які не забезпечують якісної форми, постійного ритму видачі заготовок при поточковім виробництві та економії сировини. Тому створення нових машин з використанням валкових робочих органів повинно базуватися на всебічному вивченні процесів, що проходять при течії тіста між обертовими валками. Основою деформаційних процесів течії полягає у розробці реологічних моделей з урахуванням виду дисперсних систем.

Проведена в останні роки реконструкція цих машин була спрямована на удосконалення їх компоновки і форми робочих органів. Одночасно спрямовували пошук на підвищення надійності і довговічності. Для удосконалення конструкції і розробки принципово нових машин на даному етапі розвитку техніки недостатньо однієї інтуїції конструктора, винахідника – потрібні глибокі знання всіх тонкощів процесу, його математичний опис. Це дозволить розрахувати роботу машини на основі залежностей, одержаних із загальної теорії процесу і його моделі. При розрахунку даних машин основні труднощі виникають із-за непостійності швидкості переміщення тіста, а відповідно і зсувних деформацій. Одночасно впливають невеликі довжини і конфігурація робочих камер, по яких відбувається течія тіста.

До останнього часу при розгляді робочого процесу звертали увагу здебільшого на вплив робочого тиску, точність поділу, формування, розкатування. Сьогодні при розрахунках даного класу машин необхідно звернути увагу на вплив процесу в робочій камері, що приводить до зміни властивостей тіста та вплив його якісних показників на готову продукцію.

Інтенсифікація нагнітання тіста не у всіх випадках приводить до його ефективності технологічних процесів, але завжди пов'язана із збільшенням витрат енергії і вартості устаткування. Тому при виборі конструкції і проектуванні машини необхідно з'ясувати вимоги до технологічного процесу. Роль валкових робочих органів у вузлах нагнітання різного класу машин обмежена розподілом середовища в об'ємі камери, що служить початковою умовою при виборі типу валкового органу, його розмірів і швидкості обертання.

При заданому об'ємі продуктивність машини залежить тільки від інтенсивності нагнітання. Недостатня інтенсивність нагнітання (створення течії середовища) може призвести до того, що навіть при середніх значеннях концентрації і температури в камері їх локальні значення в деяких областях оброблювального об'єму вийдуть за допускові межі.

Умови нагнітання середовища в даному випадку враховують три вимоги:

- 1) забезпечення необхідного коефіцієнта тепловіддачі в середовищі;
- 2) досягнення рівномірності розподілу концентрації і температури в камері машини;
- 3) розподілення рівномірного тиску із створенням умов якісної течії.

Принципові функціональні схеми основних типів тістоформувань, тістоподільних машин у вигляді матриць подані в літературі [7, 9]. Аналіз конфігурації робочих камер, робочих органів і способів їх дії на середовище дозволяє аналізувати і прогнозувати шляхи інтенсифікації процесу.

1.1.2. Аналіз чинників впливу валків на середовище

Сучасне технологічне обладнання для машинної обробки напівфабрикатів має забезпечити в робочих камерах машин найсприятливіші процеси, що супроводжуються мінімальними витратами сировини та збереженням її споживчої цінності з високою якістю готових виробів. Механічна подача та обробка тіста валками – технологічна операція, яка у робочих камерах під їх дією визначає цілий ряд процесів:

- структуроутворення формуючого виробу;
- структуроутворення тістової заготовки;
- структуроутворення при замішуванні тіста;
- енергоємність і технологічність операції ділення, формування, розкачування, транспортування, подріблення;
- якісні показники напівфабрикатів та готових виробів.

Удосконалення конструкції валків та робочих камер базується на розумінні усього процесу, що повинен забезпечувати раціональні параметри й оптимізацію конструктивного їх виконання відповідно до основ технології. В процесі дії на тісто валками, воно отримує різні механічні, хімічні, мікробіологічні, гідродинамічні, теплові, масообмінні впливи із сторони робочих органів машини. При деформації тіста порушуються структурні зв'язки, степінь їх порушень визначається величиною зусиль зовнішньої дії. Внутрішній опір тіста залежить в значній мірі від багатьох факторів: сорту борошна, рецептури, специфіки технологічного процесу. Знання цих факторів та їх залежностей від технологічних параметрів, відношення рецептурних компонентів дозволить вирішити проблему контролю якості формування виробів.

Технологічну основу процесу формування складають два взаємопов'язані характери розвитку деформації на різних структурованих маси тіста, які відрізняються величинами умовної деформації і умовною роботою деформації. Ці два характери деформацій визначають поведінку процесу. Деформація при формоутворенні носить пружний, пружно-еластичний і пластичний характер. Вона є основним фактором, що визначає зміну фізико-механічних властивостей поверхневого шару маси тіста.

Конструктивні форми нагнітаючих валків і робочих камер зумовлені зусиллями, що діють, і траєкторією переміщення елементарних частинок тіста в зонах. В зонах камери можна передбачати повністю сформовану картину течії пластичної маси тіста. Під дією прикладених сил поблизу точки первинного

зіткнення на поверхнях тіста і камери виникає їх взаємодія, яка сприяє стискуванню маси тіста. Стискатиметься дана маса тіста до деякої ділянки, що є областю контакту. Оскільки тісто із контактуючою поверхнею має різні величини стискання, то контактне стискання викликає тангенціальні переміщення на поверхні контакту. На кожній поверхні контакту вони будуть свої, що приводить до ковзання. Дане ковзання по поверхні валків до деякої міри може стримуватися тертям. Тому в центральній частині контакту матиме місце повне зчеплення, а ковзання можливе тільки в зоні, що примикає до межі області контакту до камери. У разі, коли коефіцієнт граничного тертя достатньо великий, то ковзання може повністю виключитися.

Перша важлива умова, яка забезпечує нормальну роботу нагнітаючих валків – це створення тангенціальної реакції. Дана реакція повинна перешкоджати вільному повертанню всієї маси тіста в робочу камеру. Тому необхідно, щоб тангенціальна складова сил зчеплення (прилипання) частинок тіста з поверхнею робочої камери перевершувала сили зчеплення частинок тіста між собою. Така умова повинна проявлятися лише до елементарних частинок пограничного шару тіста, що контактують з поверхнею камери.

Подальші елементарні шари і частинки будуть зв'язані з пограничним нерухомим шаром тіста силами взаємного зчеплення. Вони не залишаються абсолютно нерухомими по відношенню до робочої камери, а більшою чи меншою мірою братимуть участь в складних переміщеннях пластичної маси тіста, що нагнітається.

Друга умова для поліпшення роботи нагнітаючого валка – це зменшення аксіальної реакції, яка гальмує корисне переміщення тіста уздовж осі валків. Бажано, щоб аксіальна складова сил зчеплення частинок тіста з поверхнею робочої камери була менша сил зчеплення частинок тіста між собою. Вирішення цих завдань досягається ретельною обробкою, бажано з поліровкою, внутрішніх стінок робочої камери

Третя умова для полегшення транспортування (переміщення) тіста – це уздовж поверхонь валків нанести різної конструкції рифлів або насічок, що ускладнюють прокручування тістової маси. Рифлі повинні бути неглибокими, щоб уникнути надмірного зростання зворотного руху тіста в них.

Для розробки та удосконалення обладнання з валковими робочими органами і його реалізації, необхідна науково-обґрунтована методика розрахунку робочих параметрів, що протікають в цих машинах. Одночасно необхідно удосконалювати технологічний процес в робочій камері на основі раціональних конструктивних параметрів. Великий розвиток в дослідженні

течії неньютонівських рідин в зазорі обертових валків одержала гідродинамічна теорія в області переробки харчових мас завдяки науковцям О. Г. Луніна, Ю. А. Мачихіна, С. А. Мачихіна, В. А. Арета, В. А. Панфілова та ін. Ними було встановлено, що тісто відноситься до псевдопластичних тіл, течія яких описується степеневим законом Оствальда [2, 4, 5].

Н. В. Зайцев, О. Т. Лісовенко досліджували роботу валків при вальцюванні, нагнітанні, закатуванні хлібопекарського тіста [7]. Ними розглянуто характер руху тіста в зазорі між валками та умови затягування кулеподібного куска. Проблеми течії тіста в зазорі між місильним циліндричним робочим органом та робочою камерою висвітлені в роботі [9] при дискретному замішуванні тіста.

Відомо [6, 7, 8], що замішане та виброджене тісто перебуває в різному агрегатному стані й отримує здатність до в'язкої течії, тобто, до великих значень пластичної деформації. Природа полімеру, а саме – значна довжина молекул, їх просторова конфігурація, хімічні зв'язки між ними додають до взаємного відносного руху молекул при пластичній деформації пружну деформацію (випрямлення молекули в лінію) та високо еластичну деформацію (пов'язана з зміною взаємодії між молекулами при їх випрямленні). Пластична деформація полімеру викликає зміну орієнтації молекул, а саме, їх випрямлення вздовж ліній потоку, при цьому змінюється кількісно взаємодія між активними ділянками молекул [10]. Отримання якісного тістового напівфабрикату при високій однорідності всіх фізичних характеристик забезпечується рівномірним розподілом та однорідних по розмірах фазових частинок по всьому об'єму.

Аналіз літературних джерел свідчить [1, 10, 13], що валкові робочі органи у формувальних машинах виконують процес переважно за рахунок зсувних деформацій або зміни деформації. Процеси нагнітання, розкачування, транспортування практично в усіх випадках необхідно розглядати як основні і проводити пошук різних конструктивних способів надійності роботи даного класу машин.

Формування високов'язких рідин, є наслідком деформації зсуву і розтягу в робочій камері при взаємодії валкових робочих органів з середовищем. Величина деформації зсуву об'ємної маси тіста D у робочій камері визначається величиною середньої швидкості зсуву γ та тривалості всього циклу τ [16]:

$$D = \gamma \cdot \tau \quad (1.1)$$

Дане рівняння середньої деформації зсуву характеризує властивість машин з валковими робчими органами. З рівняння (1.1) випливає, що інтенсивності переміщення маси тіста для нагнітання в машинах можна досягнути збільшенням швидкості зсуву або збільшенням тривалості процесу. Збільшення тривалості процесу нагнітання пов'язане з кількома проблемами: збільшенням розмірів обладнання (робочої камери) або збільшенням кількості одиниць валків; збільшенням фінансових витрат та погіршенням деяких економічних показників виробництва. Із цього випливає, що найбільш ефективним методом збільшення надійності і якості формованих тістових заготовок є збільшення середньої швидкості деформації зсуву.

Одним з важливих аспектів отримання бубликів із дріжджового тіста з високими технологічними характеристиками є забезпечення значного адгезійного контакту між валками гетерогенної системи на межі поділу фаз. При цьому важливе значення має аналіз залишкових напружень після нагнітання та їх релаксації. Відомо [4, 7], що залишкові напруження виникають внаслідок міжфазової взаємодії компонентів при утворенні структурних зв'язків у тісті в процесі деформації механічної дії робочих органів машини. Саме тому важливим є вироблення нових методів регулювання швидкості фізико-хімічних процесів структуроутворення бубличних тістових заготовок, що дозволяють впливати на величину залишкових напружень.

Актуальним є дослідження дифузійних явищ на межі поділу фаз при нагнітанні. Міжфазова взаємодія компонентів не обмежується адсорбцією на поверхні твердої фази (борошно). Автори роботи [4, 8, 11, 14] виявили, що тут відбуваються структурні перетворення на молекулярному рівні, який зумовлює формування шарів тіста. При цьому рівень утворення залежить від впливу робочих органів та сприятливих додаткових конструктивних факторів машини, тиску та ін. У результаті різних стадійних впливів валків на тісто процес нагнітання переходить до термодинамічно і кінематично нерівноваженого стану у певному періоді. Такі процеси супроводжуються зростанням вільної енергії поверхневих шарів, а густина тіста зменшується внаслідок збільшення вільного об'єму робочої камери, що активно сприяє на наступних стадіях. З точки зору термодинаміки, при формуванні гетерогенних систем важливо враховувати здатність тіста до адгезії на поверхні валків. Доведено [2, 4, 7], що поведінка тіста під впливом зовнішніх факторів залежить переважно від межі поділу фаз.

Зменшення товщини пограничного шару потоку зумовлює збільшення градієнтів масообміну, що в свою чергу збільшує дисперсність тіста і вільну

поверхню дисперсної фази із суттєвою аерацією. Це позитивно впливає на якість бубличного тіста. Ефективністю міжфазової взаємодії є використання сукупності різних за характером багаторазових впливів на тісто, що реалізовується одночасним застосуванням різної конструкції валкових робочих органів. При цьому має виконуватися основний принцип циркуляції – одноразовий рух замкнутим контуром. Можна стверджувати, що найбільш ефективною формою механічних впливів, що змінюють характер процесу є форма поверхні, діаметр валків. Важливо, що при такому підході створюються умови для допускового зниження в'язкості тіста, прискорення процесів і збільшення його контактування з поверхнею валка. При цьому змінюються не тільки реологічні властивості, але й сам характер процесу формування тіста.

Доведено [8, 10, 14, 16], що площа контакту найбільш ефективно впливає на шари дисперсної системи, оскільки з передачею енергії від шару до шару величина імпульсу зменшується за рахунок дисипації енергії в об'ємі тіста. Основним критерієм оцінки ефективності роботи є коефіцієнт рівномірності, що дозволяє порівняти інтенсивність і якість сформованої тістової заготовки.

Важливими чинником поліпшення процесу нагнітання є визначення оптимальних режимів, що дозволяє забезпечити високі характеристики заготовки з високим рівнем надійності машини. Отже, для вивчення фізико-механічних процесів необхідно враховувати усі фактори впливу на нього і їх дальші властивості. При дослідженні міжфазової взаємодії виникає потреба з'ясувати механізм поверхневих явищ з точки зору термодинаміки і молекулярної фізики.

1.2. Основні напрямки та шляхи ефективного нагнітання тіста

Сьогоднішня техніка з валковими робочими органами для потреб хлібопекарської та кондитерської промисловості досить консервативна, і українські машинобудівні заводи виготовляють в основному машини давньої розробки, що практично протягом десятиліть не зазнали суттєвої модернізації. Нагнітання тіста з низькою вологістю на такому обладнанні стало складним завданням. Правда, час від часу з'являються новації в моделях машин з валками, але вони, як правило, не принципові. Формувальні машини, адаптовані для сучасного швидкісного методу формування, розкачування тіста при використанні старих пазових валків, мають ряд суттєвих недоліків і не відповідають сучасним вимогам. Насамперед тому, що в такому устаткуванні частково збалансована дія робочих і гальмівних елементів (дискретність дії,

зазор), відсутнє регулювання режиму нагнітання тіста та інше. Промисловості потрібні машини, що у повному обсязі можуть дотримуватися сучасних методів формування, розкачування, крім того, за доступними цінами [16].

Таким чином процес формування тіста відіграє важливу роль в харчовій промисловості. Однозначно це дає поштовх до створення умов у напрямку розвитку і вдосконалення машин з валковими робочими органами. Серійно випускаються машини періодичної дії, що забезпечують інтенсивний процес, регулювання його тривалості з використанням лічильників витрати енергії і автоматичних реле часу.

Формування тістових напівфабрикатів можна автоматизувати простішими і надійнішими засобами. Під час удосконалення конструкцій машин потрібно використовувати основні положення сучасної теорії деформаційної дії на тісто, обробляти і доводити прийняті конструктивні рішення на математичних моделях і експериментальних стендах з використанням комп'ютерної техніки.

З проведеного аналізу валкових робочих органів встановлено, що вони визначаються трьома основними параметрами: діаметром, зазором між валками, а також частотою обертання. Чим менша віддаль, тим швидший процес транспотування та стискання, інтенсивніше виділення теплоти і вища витрата енергії. Аналіз витрат енергії показав, що майже 90% витраченої енергії витрачається на нагрівання тіста (втрати, що негативно впливають на технологічний процес) [16].

Найбільш поширеними робочими органами, які використовуються в кондитерській і хлібопекарській промисловості подано на рис. 1.1. Конструктивні особливості валка з прямозубими пазами (рис. 1.1 а) є основними, які використовуються в сучасних машин на протязі тривалого періоду. Тому винахідники спрямовували свої розробки на таку форму, де змінювався профіль паза без зміни діаметру (рис. 1.1 б, в), поверхні і частоти їх обертання.

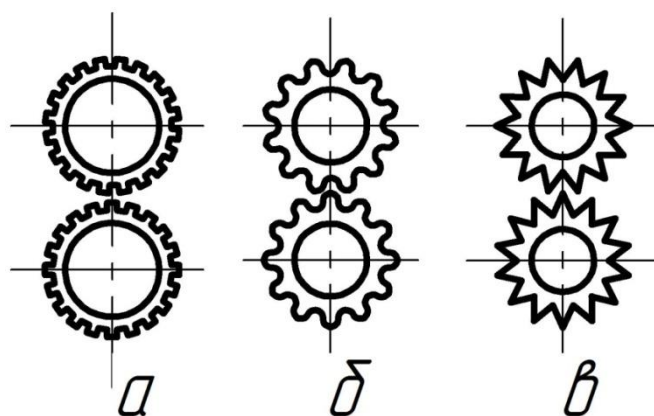


Рис. 1.1. Основні конструктивні схеми використовуваних валків

На вибір типу робочого органу впливають додаткові вимоги, які пов'язані із реологічними властивостями обробляючого середовища. Необхідно враховувати при розробці нових ВРО не тільки реологію, але і особливості конструкції машини, що спрямовані на надійність усього процесу. Остаточний тип робочого органу вибирається на підставі результатів розрахункової оцінки різних варіантів з урахуванням стандартного ряду діаметрів і номенклатури приводів (мотор-редукторів).

При удосконаленні конструкцій валкових органів слід враховувати їх вплив на процес нагнітання, перемішування і транспортування. Потрібно вибирати такі форми, що забезпечать якісне стискання та транспортування з мінімальним нагріванням маси протягом процесу, забезпечувати таку структуру тіста, що сприятиме підвищенню якості готових виробів. Основні напрями вдосконалення – зміна принципу нагнітання, конфігурації і частоти обертання, органу та форми камери [11, 12, 13].

Обґрунтованість вимог до однорідності середовища при впливі деформації спрямована на забезпечення технологічної й економічної ефективності проектної машини. Так, при розкачуванні, транспортуванні в подільних і формувальних машинах нерівномірний розподіл тіста за висотою, призводить до поступового накопичення компонентів у робочій камері і зменшення ефективності об'єму та продуктивності. Поряд з цим зайве посилення вимог до рівня однорідності пов'язане з необґрунтованим збільшенням витрат енергії, наприклад, зменшення різниці концентрацій у верхній і нижній частинах камери від 10% до 5% може привести до восьмикратного підвищення потужності приводу [13, 14].

Аналізуючи процеси дії валків, необхідно спрямовувати їх так, щоб мінімальна кількість енергії витрачалася на зміну гомогенності тіста, його перемішування, пересування та зменшення деформації. Це сприятиме раціональному використанню енергії на якісне формування напівфабрикатів. Такий підхід створює оптимальні умови для протікання наступних технологічних процесів.

Відповідно до особливостей фізико-механічних властивостей тіста процес формування можна умовно розподілити на основні етапи:

1. Завантаження замішаного тіста в робочу камеру (бункер) для досягнення поверхневого контакту між ним і робочими органами.
2. Утворення затягувальної дії валків на в'язко-пластичне тісто.
3. Утворення пружно-пластичної течії тіста при його стисканні в зазорі між валками.

При такій схемі формування тіста усі стадії процесу відбуваються послідовно по мірі надходження його маси із відповідною течією в робочій камері машини. В даному випадку робоча камера уявно ділиться на декілька зон, які відрізняються фізико-механічними властивостями та характером взаємодії робочого органу.

Враховуючи те, що на перших хвилинах процесу на робочі органи впливає сила ваги і сила внутрішнього в'язкого тертя тіста та тертя до робочих органів, виникає потреба конструктивного зменшення цих явищ. Це сприяє зменшенню величини навантажень на робочі органи, оптимальному споживанню енергії, прискоренню процесу. На наступних стадіях процесу, крім вище згаданих сил, валкові органи мають подолати сили адгезії тістової маси і силу тертя між тістом і ними. Така схема процесу характерна для всіх типів існуючих машин з валковими робочими органами.

Актуальним є вдосконалення процесів і розробка таких машин неперервної дії, у яких інтенсифікація не супроводжується значним нагріванням середовища. Такі рішення необхідно впроваджувати на основі попередніх обчислень і аналізу балансу витрати енергії на розкачування, транспортування, нагнітання та замішування. Підвищити інтенсивність процесу у неперервних машинах можна двома способами: зменшенням робочої поверхні, підвищенням частоти обертання валків; збільшення підведеної потужності.

Оскільки кожна стадія процесу деформації середовища потребує різних умов, то робочу камеру машини з валками бажано конструктивно розділити, тобто зберегти основні вимоги до транспортування, забезпечити оптимальні значення інтенсивності і тривалості впливу. Не викликає сумнівів і те, що інтенсивність впливу на середовище (без дріжджів та інших бактерій), може бути у кілька разів вищою, ніж з бактеріальними культурами [2, 7]. Тому при вдосконаленні конструкцій машин потрібно ретельно дослідити особливості процесів і забезпечити дотримання оптимальних параметрів у робочих камерах, а також враховувати конструкції валків, вплив яких має відповідати основним вимогам теорії деформації. На основі розглянутих процесів та аналізу літературних джерел, нами запропоновано напрямки удосконалення механічного впливу валкових робочих органів (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Схема удосконалення валкового механічного впливу на тісто

Поданий механізм удосконалення конструктивних особливостей машин з валковими робочими органами повинен забезпечити якісну роботу. Його треба розглядати як комплексну проблему, успішне розв'язання і вирішення якої залежить від сформульованих рекомендацій щодо співвідношення основних геометричних розмірів, взаємопогоджуваного вибору матеріалів робочого органу і корпусу робочої камери та рівня обробки їх поверхонь. Об'єктивний аналіз кінетичних закономірностей поданих рекомендацій дозволяє оцінити переваги і недоліки процесу і визначити перспективність дальших досліджень у цьому напрямку.

1.3. Основні підходи до параметрів процесу розкачування тіста

Технологічні процеси розкачування тіста валками є складним технологічним комплексом, характерними особливостями якого є високий ступінь невизначеності, велика розмірність, латентність показників якості

сировини та напівфабрикатів, багатоцільова поведінка, коли пріоритетність цілей залежить від ситуації, яка виникає в залежності від обставин на об'єкті управління. Існуючі системи управління технологічних процесів розкачування тіста не забезпечують оперативного комплексного реагування на швидкоплинні зміни ситуаційної поведінки об'єктів управління, яка залежить від багатьох чинників технологічного та організаційного характеру.

Аналіз праць дослідників [4, 8] дозволив виділити особливості як складного об'єкта управління та шляхи їх удосконалення: багатофакторність (оцінки комплексних показників якості сировини, напівфабрикатів та готової продукції); невизначеність (апроксимація основних змінних об'єкта і визначення тенденції розвитку об'єкта); багатокритеріальність (встановлення критеріїв для оцінки функціонування об'єкта управління та провести оцінку ситуаційного змінювання їх пріоритетності та визначити шляхи їх розв'язання).

На основі аналізу принципів управління складними технологічними комплексами були визначені перспективні напрямки розвитку систем управління стадійності розкачування валками: сценарний підхід та використання інженерії знань. Поліпшити ситуацію можливо за рахунок використання мобільності управління процесу в робочій камері з валковими робочими органами. Мобільність ґрунтується на основі моделі технологічного процесу розкачування, а також управління параметрів із застосуванням керованих механізмів – частоти обертання валків, тривалості їх дії, температурних режимів, дискретно-імпульсного впливу валків на середовище, створення більш досконалих поверхонь валків. Тому розробка систем багатоцільового управління технологічними процесами стадійності розкачування, формування на основі розробленого підходу та конструктивних параметрів нових конструкцій валків, сприятиме підвищенню продуктивності, зменшенню питомих втрат і витрат ресурсів та сировини, поліпшенню якості продукції.

На сьогодні процеси розкачування, транспотування, стискання, нагнітання середовища можна виділити у галузь, яка базується на вивченні механічних процесів, мета яких – забезпечення максимального рівня однорідності стиснутих шарів середовища у кінцевій операції. Головним критерієм ефективності даного класу машин, окрім цього, є витрати енергії, необхідної для одержання напівфабрикату з необхідним рівнем однорідності. При цьому найбільш ефективним буде та машина, у якої оптимально поєднані максимальна інтенсивність впливу робочого органу на середовище, мінімальний рівень енергоспоживання та необхідна якість готової продукції.

У даний час існує значна кількість видів валкових робочих органів, частота обертання, рівень механічних деформацій на тісто, що дозволяє інтенсифікувати процес з метою прискорення його формування з дотриманням оптимальних значень питомої роботи за відповідно малий час. Характерною особливістю цих машин є те, що під дією екстремальних умов у камері машини частково відбуваються зміни структурного складу компонентів і процес цих змін суттєво залежить від хімічного складу борошна та температурних режимів тіста, яке поступає на формування. Вони ґрунтуються на перспективних параметрах впливу з формуванням умов впливу при встановлених методах регулювання деформаційних процесів. Тому наявні конструкції формувальних, тістоподільних машин не повною мірою відповідають вимогам якості технологічного процесу. Цей ефект можна пояснити зміною величини сили тертя між середовищем і поверхнею валків, яку науковці стараються у своїх роботах [7] мінімізувати. Ця зміна і призводить до збільшення енерговитрат.

Робота машин з валковими робочими органами спрямована забезпечити поділ, розкачування, формування, нагнітання тіста на заготовки з точністю $1\div 2\%$ з урахуванням його властивостей. Конструктивно формувальні та тістоподільні машини з валками є найскладнішими порівняно з іншим обладнанням.

За робочий цикл валки в машині здійснюються такі операції:

- заповнення робочої камери тістом;
- стиснення його до робочого тиску;
- переміщення по робочій камері;
- заповнення мірної камери;
- стабілізування тиску;
- видача відміреної заготовки;
- повернення надлишку тіста в приймальну камеру.

В залежності від конструктивних особливостей машини, вказані вище операції можуть поєднуватися, змінюватися в послідовності або зовсім вилучатись. Дані операції відбуваються в камері тістоподільної машини і формувальної для бубликів та визначають її робочий процес. Основними функціональними елементами цих машин є: нагнітальний вузол тіста та подільний пристрій. Тісто під тиском заповнює мірні кишені подільної головки. Залишки тіста залишають робочу камеру.

На сьогоднішній день не існує класифікацій валкових машин. Тому їх можна розбити на дві групи: з фіксованим і нефіксованим ритмом роботи. У машинах з фіксованим ритмом привід всіх робочих органів здійснюється від

жорсткої кінематичної схеми з певною періодичністю. У машин з нефіксованим ритмом роботи механізм, що відокремлює шматок від загальної маси, не пов'язаний із загальним приводом машини і включається в дію від імпульсу, одержуваного при заповненні тістом всього об'єму мірної кишені або при досягненні шматком тіста заданої довжини. Незважаючи на те, що в цих машинах всі операції процесу відбуваються в певній послідовності, загальний період їх циклу роботи не постійний і залежить від подачі тіста. Машини з нефіксованим ритмом роботи відрізняються підвищеною точністю, але мають більш складну конструкцію. Найбільш важливими функціональними елементами машини є робочі органи, робоча камера і ділильний пристрій.

В залежності від способів дії на напівфабрикат, валки в машинах розміщуються горизонтально, паралельно один до одного (нагнітання), вертикально один над одним (розкачування), в комбінованій взаємодії (транспортування). Таке розміщення валків забезпечує постійність тиску в робочій камері машини в момент відмірювання дози тістової заготовки або її розкачування. Відомі також машини (одновалкові), що здійснюють замішування горизонтальним робочим органом з насічками [16]. Такі машини застосовуються в основному на мініпекарнях.

Величина буферної місткості (бункер) визначає стабілізаційний вплив на процеси. Він є частиною робочої камери, що постійно залишається заповненою тістом після закінчення робочого циклу.

До конструкцій машин ставляться такі вимоги:

- можливість регулювання маси відміряного шматка тіста у заданих межах в залежності від сорту, складу і консистенції тіста;
- постійна швидкість розкачування джгута;
- постійна щільність тіста при діях валків для забезпечення точності маси шматків та якості продукції.

При дії валків на виброджене борошняне кондитерське та прісне (макаронне) тісто відбуваються різні процеси. Дії тиску на зброджене тісто зменшує об'єм газової фази та проходить поглинання частини газу тістом. При одночасній механічній деформації газові бульбашки поділяються на менші, що сприяє утворенню рівномірної мікропористої структури та видаленню великих бульбашок. Така структура спроможна краще утримувати газове середовище на наступних етапах технологічного процесу.

Розрахунок процесу стиснення тіста в робочій камері валкової машини визначається рівнянням стану вибродженого тіста. Рівняння виражає функціональний зв'язок між питомим об'ємом та тиском, що прикладається до

тіста, яке знаходиться в замкненому просторі при постійній температурі. Отримати таке рівняння аналітичним шляхом, як це робиться в термодинаміці для газових сумішей, неможливо, оскільки тісто, яке надходить, має не однофазну, а багатофазну композицію. Об'ємна маса хлібного тіста після замісу $\rho_n = 1100 \dots 1180 \text{ кг/м}^3$, в кінці бродіння перед розподілом $\rho_\delta = 820 \dots 900 \text{ кг/м}^3$, після розділення $\rho_T = 1040 \dots 1090 \text{ кг/м}^3$ [7, 13].

Із літературних джерел відомо [7, 16], що із збільшенням робочого тиску підвищується точність роботи валкової машини до певної межі. Коли тиск перевищує визначену величину (межу), виникає небажана зміна тіста, погіршення його якості. Досліди проведені в НУХТі показали, що інтенсивна механічна обробка тіста впливає на точність поділу тістових заготовок. Вона може бути досягнута при низькому тиску близько 0,05 МПа внаслідок попереднього видалення вуглецевої кислоти з тіста. Раціональним тиском в робочій камері слід вважати $0,05 \div 0,1$ МПа, при якому досягається найкраща комбінація всіх показників роботи машини.

Останні закордонні розробки в галузі розділення та формування тіста показали, що робочий тиск в межах $0,05 \div 0,12$ МПа не призводить до зниження точності роботи машини, але істотно впливає на зниження металомісткості та витрат енергії на привід машини, а також сприяє спрощенню конструкції та підвищенню надійності її роботи [16].

Для виявлення раціональних параметрів робочого процесу машини можна використовувати методику професора Лісовенка О.Т. Вона ґрунтується на тім, що зразки тіста заводського приготування стискали в експериментальній камері, а потім округлювали вручну. Об'єм заготовок розраховували за допомогою рівняння [8]:

$$V = 0,513d^2 hk, \quad (1.3)$$

де d – середній розмір заготовки, який визначається як середньоарифметичне двох взаємо перпендикулярних вимірів діаметра заготовки;

h – висота заготовки;

k – коефіцієнт, що враховує відхилення фактичного об'єму від розрахункового; для тіста з пшеничного борошна 1 гатунку $k = 1,09$;

2 гатунку $k = 1,06$.

Це дозволило встановити факт позитивного впливу тиску на укріплення структури тіста та зону раціональних значень тиску в робочій камері машини в межах $0,1 \div 0,2$ МПа.

Однак при виборі раціонального значення робочого тиску створеного валками необхідно враховувати цей факт, що при зниженні робочого тиску з 0,2 до 0,1 МПа досягається краща комбінація показників якості тіста, знижуються потужність приводного електродвигуна та витрати енергії приблизно на 30%, майже вдвічі зменшується об'єм максимальних навантажень на всі рухомі елементи машини, значно підвищується довговічність та безвідмовність роботи тістоподільної машини. Тому, раціональним тиском у робочій камері прийнято значення 0,1 МПа, при якому досягається найкраща комбінація показників роботи тістоподільників [7].

1.4. Призначення та функціональні ознаки валкових машин

Валкові машини являють собою одну з найбільш численних груп устаткування харчових, фармацевтичних, хімічних та металургійних підприємств, що відрізняються досить складною конструкцією і різноманітністю принципів схем. Розглядаючи схеми машин та використовуючи наведені математичні залежності, можна зробити порівняльний аналіз і висновки щодо переваг, а також недоліків тієї чи іншої машини. Для полегшення аналізу робочих процесів, нами розроблено класифікацію машин (рис. 1.3). Розглянемо функціональні схеми основних конструкцій валкових машин за призначенням, характером дії, формою робочого валка.

На рис. 3 показано обґрунтування впливу геометричних розмірів валкових робочих органів на тісто в обладнанні при умові технологічних характеристик існуючих і можливих удосконалених й розроблених машин та процесів для нагнітання, транспортування, розкачування, формування й замішування тіста. Конфігурація валкових робочих органів, їх характер дії та призначення, частота їх обертання впливають на вид і рівень механічних деформацій тіста та його оптимальну величину. Цього можна досягнути підбором відповідної конструкції і кількості робочих органів, збільшенням числа їх робочих циклів (обертів або інших переміщень) за одиницю часу, або з урахуванням обох чинників.

Тістоподільні машини з валковими робочими органами. Нагнітання тіста виконується однією або двома парами валків, що обертаються назустріч один одному з постійною швидкістю. У цих машинах стабілізатори тиску, як правило, не використовуються. Мірні кишені можуть бути розташовані по периметру ділального барабану або за його твірною.

Основними недоліками валкових нагнітачів є незручність регулювання зміни подачі тіста, а також відсутність стабілізатора тиску в робочій камері подільника. Однак подільники з валковим нагнітанням мають і суттєві переваги: простота конструкції, надійність в роботі і бережний вплив на структуру тіста.

Тістоподільні машини з двовалковими нагнітачем (рис. 1.4 1 А) мають приймальний бункер 1, валки 2, які зазвичай використовують для пшеничного тіста 3, так як вони відрізняються порівняно м'яким впливом на нього. Тиск, що створюється нагнітачем в робочій камері 4, залежить від діаметра валків 2 і зазору між ними. Машини зазвичай працюють без стабілізаторів тиску.



Рис. 1.3. Схема класифікації валкових машин

До них належать тістоподільники ХДВ, РТ2-РМК, системи Целіка, ХЛС-9 та ін. Валкові нагнітачі найчастіше використовують для пшеничного тіста. Вони відрізняються порівняно м'якою дією на тісто. Тиск, що створюється нагнітачем у робочій камері, залежить від діаметра валків та зазору між ними.

Тістоподільна машина РЗ-ХДП з валковим нагнітачем (рис. 1.4, 2 А) призначена для вироблення дрібноштучних тістових заготовок з борошна вищого сорту. У корпусі 1 розташовані рифлені валки 2 і ділильна головка 5. Тісто 3 з приймального бункера рифленими валками 2, що обертаються назустріч один одному, подається в камеру 4, звідки воно нагнітається в мірні кишені головки 5, яка обертається.

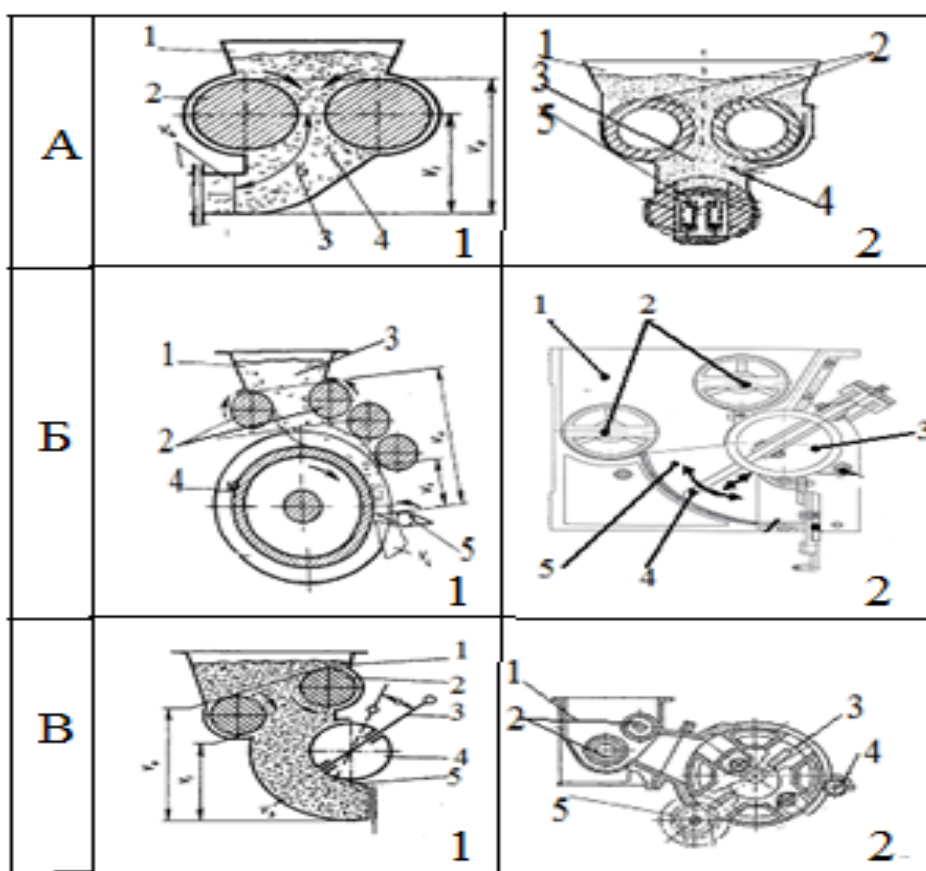


Рис. 1.4. Функціональні схеми тістоподільних машин з валковими нагнітачами

При багатовалковому нагнітанні в подільних машинах (рис. 1.4, 1 Б) нагнітальні валки 2 подають тісто 3 на формуючий барабан 4. Відформована набором валків і ребордою барабана тістова стрічка ріжеться обертовими пластинчастими ножами 5. До них відносяться багаторядні тістоподільні машини ФАТВ (Німеччина), «Гефра» (Голандія) та ін. Вони призначаються для виготовлення дрібноштучних виробів із пшеничного сортового борошна.

Відділення шматків від прокатоної стрічки проводиться ножами, що обертаються. Тістоподільна машина komponується з оригінальним багаторядним округлювачем, після якого тістові заготовки виходять рядами по 4–5 штук.

Тістоподільна машина «IBIS» з комбінованим нагнітанням призначена для об'ємного поділу житнього та житньо-пшеничного тіста на шматки заданих розмірів. Поєднання комбінованого нагнітання і відтинання ділильним пристроєм забезпечує порівняно м'який вплив на тісто, високу точність ділення і мале споживання енергії. До таких машин належать тістоподільники «Діва», «Ультима» (ФРН), «Соча» (Югославія), С-70 (Угорщина) та ін. Машини цієї групи відрізняються низьким тиском в камері нагнітання.

Відстань між нагнітальними валками становить 90 мм, що сприяє створенню в робочій камері порівняно невеликого тиску, який стабілізується за рахунок протитечійного руху тіста в центральній частині міжвалкового простору.

У тістоподільних машинах з валковим нагнітанням пшеничного тіста діаметр валків необхідно приймати рівним 100...250 мм, оптимальний зазор між валками 10...12 мм. Для нагнітання житнього тіста вологістю 50...53% діаметр валків повинен бути не менше 220 мм. Колова швидкість валків не повинна перевищувати 0,7 м/с, поверхня валків бажано щоб була рифлена.

Потужність для приводу нагнітальних валків:

$$N_1 = M\omega,$$

де ω – кутова швидкість валків, рад/с;

M – результуючий момент на привідному валу валкового нагнітача:

$$M = pR^2l(\alpha + 2\beta)\operatorname{tg}\varphi,$$

де p – робочий тиск;

R – радіус валка;

L – довжина валка;

α, β – кути живлення і нагнітання, рад; φ – кут тертя тіста об валок (для пшеничного тіста залежно від рецептури і вологості $\varphi = 25...30^\circ$; $\operatorname{tg}\varphi$ змінюється від 0,47 до 0,57).

Тістозакаточні машини. Призначені для надання шматкам тіста циліндричної форми і їх обробки для створення поверхневої плівки, збільшення

пористості м'якушки та рівномірного розподілу газів. Операція розкочування, округленого шматка тіста в плоску заготовку здійснюється за допомогою однієї, двох або більшої кількості пар валків, що мають зустрічне обертання. Ці машини відрізняються надійністю і хорошою якістю обробки тіста. Ступінь механічної обробки заготовок при формуванні практично не залежить від їх маси, а визначається в першу чергу величиною зазорів між несучими і формуючими органами, фрикційними і адгезійними властивостями напівфабрикату і співвідношенням напруг зсуву та стиснення при обробці заготовок.

Однією з основних умов працездатності тістоформувальних машин є ефективність методів боротьби з прилипанням і розмазуванням тістових заготовок по робочих органах цих машин.

При виході з тістозакаточних машин заготовка має ефект еластичного відновлення, що виникає від дії внутрішніх напружень. Величину еластичного відновлення Ю. К. Берман визначив з урахуванням реологічних властивостей напівфабрикату і конструктивних параметрів тістозакаточних машин:

$$\frac{D}{2h_i} = \lambda \gamma' = \frac{\eta_0}{G} \frac{V_H + V_\Phi}{2h_i},$$

де D – діаметр заготовки після еластичного відновлення;

h_i – зазор між несучим і формувальним органами;

λ – період релаксації;

γ' – швидкість зсуву;

η_0 – в'язкість тіста;

G – модуль пружності зсуву;

V_H, V_Φ – швидкості несучого і формуючого органів закаточної машини.

У розрахунках можна приймати $\eta_0 = 0,12 \cdot 10^5$ Па с; $G = 4,45 \cdot 10^5$ Па. Потужність, необхідна для приводу вузла вальцювання,

$$N_1 = M\omega,$$

де M – крутний момент на валиках:

$$M = P \left(D \sin \frac{\beta}{2} + d_0 \mu \right),$$

де P – розпірне зусилля ($P = Fr_{cp}$, тут F – вертикальна проекція поверхні контакту заготовки з валиком;

r_{cp} – середній тиск тістової заготовки на валок;

за даними Н. В. Зайцева $r_{cp} = 12... 40$ кПа);

D – діаметр валика;

B – кут захоплення тістової заготовки;

d_0 – діаметр цапфи валика;

μ – приведений коефіцієнт тертя в підшипниках;

ω – кутова швидкість валика.

Непогані результати для зниження прилипання дає обдування робочих поверхонь устаткування й оброблюваних шматків тіста підігрітим повітрям. До недоліків цього способу слід віднести громіздкість металоконструкцій повітропроводів і їх кріплення, а також утворення потовщених кірок випечених виробів.

У ряді випадків для зменшення прилипання заготовок використовують змочування робочих поверхонь тістоформувань машин водою (у виробництві житнього хліба), змазування рослинним маслом або емульсією. Найбільш ефективним способом є обробка робочих органів тістоокруглювальних, заочувальних машин, деталей і механізмів посадки тістових заготовок сучасними полімерними композиціями, основу яких складають фторопласт-4 (тефлон) або кремнійорганічні рідини (силікон).

Антиадгезійні покриття дозволяють виключити використання рослинного масла і харчових жирів як мастила для формувальних поверхонь, зменшити втрати сировини і готової продукції; збільшити продуктивність обладнання, підвищити культуру виробництва, поліпшити санітарно-гігієнічні умови праці і товарний вид продукції.

Майже повна відсутність прилипання досягається при охолодженні поверхні розкачувальних валків закаточних і спеціальних формуючих машин до температури 2... 4°C за рахунок подачі в них охолоджуваних рідин.

Менше прилипання заготовок і більш надійна робота характерні для формуючих машин, що мають високу швидкість руху шматків в зоні обробки і спеціальний рельєф поверхні робочих органів (рифлення, насічки та ін.). Це пояснюється зменшенням тривалості та площі контакту тістової заготовки і робочих органів обладнання.

Найбільш розповсюдженими машинами з валковими робочими органами, які відносяться до класифікаційних ознак подано на рис. 1.5. Вони широко

використовуються у харчовій галузі при виробництві дрібно штучного напівфабрикату для кондитерських виробів.

У ряду А подано: 1 – Розкачувальні МНРТ-130/600- $d=160$; $l=600$. Розкачування листкового, пісочного і дріжджового тіста, а також тіста для локшини; 2 – Тістоподільні КТМ (2-х валкова)- $d=180$ мм; $l=400$ мм. Подача тіста з пшеничного і житньо-пшеничного борошна; 3 – Натирочні Н-4М (2-х валкова)- $d=160$ мм; $l=600$ мм. Розвальцьовування жорсткого дріжджового тіста з пшеничного борошна

У ряду Б подано: 1 – Формувальні ФПЛ-1- $d=160$ мм; $l=450$ мм. Формування заготовок з дріжджового і кондитерського тіста з пшеничного борошна і суміші різних видів борошна; 2 – Тістомісильні: одновалкова ДТМ- $d=200$; $l=220$; Двохвалкова ДТМ- а) $d_1=200$; $l=220$; $d_2=160$; $l=220$.

Замішування тіста з пшеничного і житньо-пшеничного борошна; 3 – Подільно-закаточні Б4-58 (2-х валкова) – $d=160$ мм; $l=330$ мм. Подача пшеничного жорсткого дріжджового тіста.

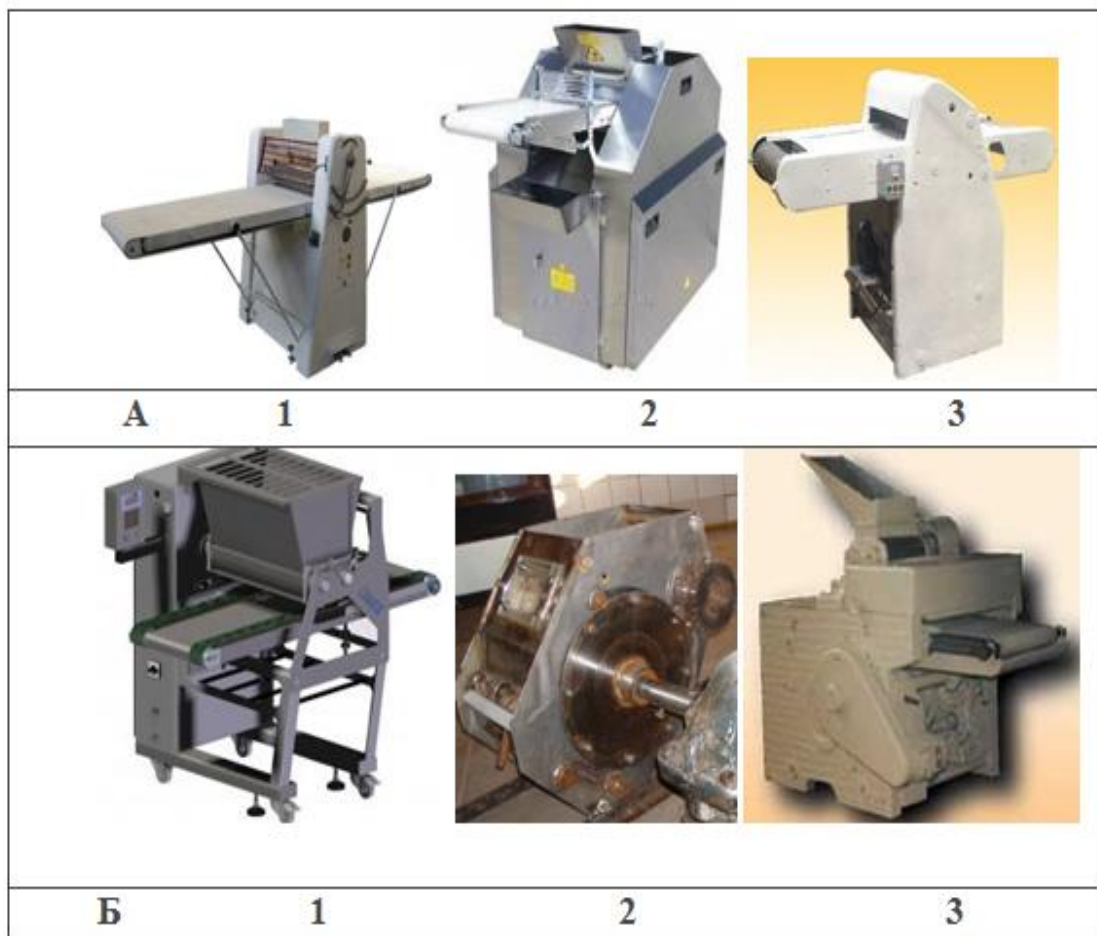


Рис. 1.5. область застосування валкових робочих органів

1.5. Огляд існуючих моделей і принципи моделювання розкачування тіста

Дослідження фізичних процесів, що відбуваються у тих чи інших технологічних одиницях обладнання, у тому числі й у формувальних машинах з валковими робочими органами, можна виконати чотирма шляхами:

- експериментом на натурному виробі (фізичне моделювання на натурному об'єкті);
- експериментом на моделі, що має ту саму природу, що й натурний об'єкт (фізичне моделювання на фізичній моделі);
- математичним моделюванням, тобто розв'язанням системи рівнянь, які описують робочі процеси об'єкта, що моделюється;
- комп'ютерна модель, тобто розв'язання процесів у робочій камері при допомозі програмних комплексів.

Математичним моделюванням називають не лише сам процес складання математичної моделі, а й процес розв'язання (чисельний експеримент на математичній моделі).

Перший із зазначених шляхів дослідження формування заготовок видається найбільш трудомістким і для отримання узагальнених даних вимагає значних часових затрат та дорогого експериментального обладнання. Значні складнощі для дослідження формування заготовок має другий шлях фізичного експерименту на фізичних моделях. Математичний експеримент на математичній моделі пришвидшує отримання шуканих результатів і не виключає методів фізичного моделювання з метою встановлення адекватності математичної моделі та натурального об'єкта.

Математичне моделювання різних робочих органів, робочої камери чи установки в цілому на в'язко-пружний стан неньютонівської рідини можна розглянути у вигляді трьох основних задач:

- синтезу (проектування, конструювання) об'єкта з оптимізацією конструктивних та режимних параметрів і прогнозування їх характеристик;
- аналізу роботи існуючих формувальних машин або їх елементів за допомогою математичної моделі, отриманої на основі заданих конструктивних характеристик;
- аналізу роботи конструктивних та режимних параметрів за допомогою статистичного математичного моделювання, отриманого на основі дослідних конструктивних характеристик.

Спільне або окреме використання цих трьох підходів у тій чи іншій постановці дозволяє розв'язувати необмежене коло задач проектування, конструювання, технології у пошуку прихованих резервів вдосконалення конструкції.

Стосовно створення математичної моделі неньютонівської рідини пов'язане з деякими труднощами, що виникають завдяки наявності деяких особливостей серед формувальних машин з валковими робочими органами, як:

- робоче тіло знаходяться у різних агрегатних станах;
- нестационарність рідинного потоку за кутом повороту робочого валка;
- невизначеність (розмитість) меж взаємодії між рідиною та газом;
- невизначеність меж розподілу температурних потоків;
- невизначеність у взаємозв'язку конструктивних та технологічних параметрів.

Математичне моделювання робочого процесу нагнітання валками уперше було описане у працях Мачихіна Ю. А. Принциповим у даному випадку є те, що він та інші, які були спеціалістами у галузі реології неньютонівських рідин, із самого початку заклали в опис робочого процесу гідродинамічну модель, розглядаючи валки як самовсмоктувальний насос, що дозволяв затягувати і нагнітати тісто із робочої камери нагнітального вузла в умовах циклічної дії валків. Суть цієї моделі полягає у тому, що валкова система, що обертається, є динамічною ланкою у ланцюгу течії тіста до формувального пристрою. Вона встановила [2, 6], що діаметр валків має перебувати у визначеному критичному стані, який дорівнює 160 мм. Зазору між валками відводиться роль, що підлягає зміні параметрів рідини (тіста) залежно від поля швидкостей та витратних характеристик. Принципово такий підхід досить коректний тому, що у вузлі нагнітання спостерігається структура та форма течії тіста, аналогічно робочим умовам зі затягування та нагнітанням. У цьому разі витіснення тіста, що стискується і розкачується у просторі між валками, замикається на течії через зазор у бік формувального пристрою.

Аналіз математичних моделей нагнітання тіста валками у рамках цієї роботи виконується на основі теоретичних та експериментальних досліджень. Моделювання робочого процесу нагнітання для будь-яких підходів та алгоритмів у кінцевому підсумку пов'язане із розв'язанням головних задач:

1) визначення геометричних параметрів, що забезпечують необхідний функціональний взаємозв'язок $\dot{V} = f(p_{sc})$ (об'ємної продуктивності та тиску стискування) для валкового режиму роботи, або $\dot{V} = f(p_n)$ (об'ємної продуктивності та тиску нагнітання) для режиму течії, температурних потоків;

- 2) описання форми поверхні розділу робочих середовищ;
- 3) визначення споживаної (або питомої) потужності машини;
- 4) визначення теплових потоків у вязкому середовищі;
- 5) описання реологічної моделі течії тіста.

Перша задача, як правило, зводиться до вибору параметрів, що описують теоретичну продуктивність, та розрахунку коефіцієнта подачі як функції від стискання або відношення тисків.

Друга задача вимагає знаходження залежності радіуса-вектора поверхні тіста за кутом повороту робочого валка в інтервалі $\alpha = 0 - \pi$.

Найбільш складними у загальній концепції моделі є завдання, в яких рівень складності залежить від точності визначення насамперед гідродинамічних процесів. Здебільшого розходження існуючих моделей робочого процесу нагнітання у різних авторів вони пов'язані саме із підходами до розрахунку розподілу швидкостей руху рідини у валковій ділянці.

Вибір базується на опублікованих результатах комплексних досліджень, які можна розглядати як замкнену модель робочого процесу, де формулюється концепція моделювання, дається достатньо повний опис алгоритму та розв'язання зазначених завдань. Для таких робіт переважно характерне уточнення розрахункових методик, що базуються на тих чи інших алгоритмах основних задач загальної моделі нагнітання тіста, описання особливостей роботи нагнітальної камери та ін.

Висновки до першого розділу

Аналіз літературних джерел щодо використання сучасних машин з валковими робочими органами є одним з перспективних напрямків розвитку технологічного обладнання, до переваг якого належить можливість спростоти їх виготовлення, надійність в роботі, зниження собівартості продукції, високий рівень механізації процесу.

Застосування у промисловості такого обладнання для нагнітання, транспортування, розкачування, формування середовища дозволяє скоротити тривалість технологічного процесу, зменшити виробничі площі і вартість устаткування та збільшити вихід продукції за рахунок поєднання виконання кількох операцій в одній машині. Останнє досягається завдяки ефектові при використанні найбільш раціональної геометричної конфігурації поверхні валків.

Дослідження машин з валковими робочими органами широко виконувалися до середини 90-х рр. ХХ ст., про що свідчить велика кількість монографій, дисертацій, статей у фахових журналах, присвячених питанням

процесу нагнітання при різних зазорах [4, 6, 10, 11, 14]. Протягом наступного за цим десятиліття такі роботи майже не з'являлися, що пояснюється частковим висвітленням проблем у минулому, а швидше погіршенням стану науки в умовах економічної кризи. Зокрема статті, опубліковані на початку 2000 р., фактично не містять нових дослідних даних, а є рекламою певної машини.

Більшість досліджень у цій сфері були несистематичними, деякі питання вивчалися однобоко, нема обґрунтованих концепцій, які дозволили б пояснити закономірності процесу. З аналізу наукових досліджень процесу на різних конструкціях валкових машин можна зробити такі висновки:

1. Повних теоретичних і експериментальних досліджень в цьому напрямі недостатньо для широкого впровадження.

2. У науково-технічній літературі подані результати вивчення впливу зазору між валками на середовище, незалежно від різних механізмів впливу на структурно-механічні властивості тіста. Поряд з цими експериментальними дослідженнями і теоретичними узагальненнями обґрунтованого механізму течії тіста не достатньо.

3. У валкових машинах як періодичної, так і неперервної дії розглядається широке коло питань щодо динаміки деформації, а механізм конструктивних особливостей робочої камери і робочого органу, що ініціюють цей процес, поданий частково.

4. Аналіз літературних джерел дозволяє визначити основні напрямки досліджень та кінетичних закономірностей дії робочих органів у валкових машинах. До цих напрямків належать теоретичні та експериментальні дослідження дії робочого органу на енергетичні і гідродинамічні характеристики руху, кінетики процесів часткового перемішування, транспортування під тиском, теплові зміни середовища та встановлення зв'язку технологічних і конструктивних параметрів. Ці напрямки лежать в основі монографії і визначають коло завдань, необхідних для досягнення поставленої мети.

Список використаної літератури

1. Басов Н. И., Казанков Ю. В., Любартович В. А. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов. М.: Химия, 1986. 488 с.
2. Блокома А. Х., Глинка И. Основные понятия о свойствах теста. М.: Наука, 1968. С. 583.

3. Васина А. Ф., Зимон А. Д., Иоффе С. М., Энкина Л. С. Факторы влияющие на течение хлебного теста. Известия Вузов, Пищевая технология. 1986. № 4. С. 25–27.
4. Гуць В. С. Прикладна реологія та інтенсифікація процесів харчових виробництв: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.18.12 УДУХТ. К., 1999. 36 с.
5. Плахотін В. Я., Тюкова І. С., Хомич Г. П. Тюкова І. С., Хомич Г. П. Теоретичні основи харчових виробництв: навчальний посібник. К.: Центр навчальної літератури, 2006. 640с.
6. Мачихин Ю. А., Мачихин С. А. Инженерная реология пищевых материалов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 216 с.
7. Лісовенко О. Т., Руденко-Грицюк О. А., Литовченко І. М. та ін. Технологічне обладнання хлібопекарських і макаронних виробництв. К.: Наукова думка, 2000. 283 с.
8. Криворотько В.М. Фізико-хімічні взаємодії в харчових середовищах. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2013. № 51. С. 103–108.
9. Стадник І. Я. Науково-технічні основи процесів та розробка обладнання для безлопатевого замішування тіста: автореф. дис. ...докт. техн. наук: спец. 05.18.12 «Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв» НУХТ. К., 2014. 40 с.
10. Стадник І., Деркач А. Обґрунтування побудови досконалості машин із валковими робочими органами. Хранение и переработка зерна. 2016. № 2 (199). С. 47–50.
11. Стадник І. Я., Деркач А.В., Василів В. П. Determination of power machine with the wolves for rolling dough. Знання. 2016. № 3–2. С. 36–41.
12. Pawel Drozdziel, Andrij Derkach, Igor Stadnyk, Tatiana Vitenko. Simulation of components mixing in order to determine rational parameters of working bodies. Advances in Science and Technology Research Journal. 2016. Vol. 9. P. 130–138.
13. Гаврилко П.П., Стадник І., Деркач А. Обґрунтування параметрів, що відбуваються в робочих камерах машин з валковими робочими органами. Научные труды SWorld. 2017. № 2 (210). Том 2. С. 34–38. (Особистий внесок: Проведення дослідів. Графічне оформлення.).
14. Деркач А. В. Оцінка валкового нагнітання тіста: VIII Всеукраїнська студентська науково-технічна конференція «Природничі та гуманітарні

- науки. Актуальні питання», м. Тернопіль, 23–24 квітня 2015 р. Тернопіль, 2015. Т. 1. С.23.
15. Деркач А., Стадник І. Дослідження впливу валкового нагнітання на якість готової продукції: тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Стан і перспективи харчової науки та промисловості», м. Тернопіль, 8–9 жовтня 2015 р. Тернопіль, 2015. С. 27–28.
16. Сухенко Ю. Г., Стадник І. Я., Василів В. П., Сухенко В. Ю. Технологічне обладнання для виробництва виробів з борошна. Частина 1: хлібопекарське виробництво. Київ:ЦП «Компринт», 2015.

РОЗДІЛ 2

РЕОЛОГІЯ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ

Різноманітність технологічного призначення, унікальність фізико-механічних та хіміко-біологічних властивостей неньютонівського середовища, специфічні вимоги до використання оброблюваної продукції в умовах відсутності загального або достатньо ефективного підходу до проектування машин харчових і переробних виробництв значно ускладнюють обґрунтування технологічних та конструктивних схем обладнання. Кінематичні, силові та енергетичні параметри технологічного завантаження в умовах дії валкових робочих органів на даний час розраховують переважно за експериментальними даними, притаманними тільки специфічним процесам обробки. Тому методи інтенсифікації технологічних процесів за допомогою впливу валків, часто не є доцільними з техніко-економічних міркувань і вимагають конкретного поєднання законів фізики, хімії, біології. Відповідно необхідно постійно спрямовувати пошук ефективних схем технологічної дії на напівфабрикат, зокрема розроблення енергозберігаючих формувальних машин. На основі використання відомих наукових положень, експериментальних досліджень та аналізу основних експлуатаційних факторів при проектуванні технологічного обладнання, провести обґрунтований аналіз та намітити шляхи комплексного підходу до конструктивних й технологічних параметрів вузла нагнітання формувальної машини. Такий підхід встановлює основні наукові напрямки даної монографії.

Для розробки ресурсозберігаючих технологій і обладнання при виробництві хлібобулочних і борошняних кондитерських виробів необхідна економія матеріальних ресурсів на всіх етапах – при створенні обладнання і виробництві продукції. У вирішенні даної проблеми велику роль відіграє реологія, що дозволяє створити науково-обґрунтовану конструкцію обладнання і раціональні технології. В монографії розглянуті теоретичні і практичні питання, що зв'язані з процесами механічної обробки тіста та врахуванням його реологічних властивостей.

На вибір реологічної моделі течії дріжджового тіста впливає багато чинників. Найбільш поширеними реологічними моделями поведінки псевдопластичної та в'язкопластичної рідин є моделі Оствальда, Бінгама, Балклі-Гершеля [1]. Ці моделі прийняті за базові для інтерпретації течії неньютонівських рідин в різних галузях промисловості. Додатком до них

розроблено багато інших моделей, які можуть застосовуватись для опису конкретних неньютонівських рідин. Так, моделі Кроса, Рейнера-Філіпова, Ван Вазера, Пауела-Ейрінга тощо, корисні для моделювання псевдопластичних режимів на низьких, середніх і високих швидкостях зсуву. Деякі рівняння, такі як модифіковане рівняння Кесона, узагальнене Балклі-Гершеля використовують для вирішення інженерних розрахунків у технологічних процесах, де застосовуються в'язкопластичні рідини [2]. Тому однією із відповідальних і часто складних задач є визначення швидкості зсуву матеріалу в робочих органах технологічних апаратів та машин і відтворення в робочих камерах саме тих швидкостей зсуву, яким він піддається в технологічному обладнанні. Результати апроксимації експериментальних реологічних кривих показують, що одній і тій самій рідині в певному діапазоні швидкостей зсуву може бути підпорядковано декілька реологічних моделей, які за обраним критерієм не поступаються одна одній.

Вибір моделі вирішується на основі врахування області застосування та її практичної зручності. Прикладом такого підходу є розроблення реологічних моделей для дріжджового тіста при нагнітанні існуючими і новими валками.

2.1. Аналіз моделей неньютонівських рідин

Характеристики деформаційних процесів і релаксаційних властивостей матеріалу визначають реологічні параметри. Деформація, тобто зміна форми і розмірів тіла, що виникає під дією зовнішніх сил, супроводжується виникненням внутрішніх сил взаємодії в структурі середовища. Мірою їх інтенсивності є напруження, серед яких розрізняють повне, нормальне і дотичне. В загальному випадку об'ємний напружений стан тіла визначається тензором напружень [2, 3]

$$\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} \quad (2.1)$$

де σ, τ – відповідно нормальне і дотичне напруження.

Оскільки по закону парності і рівності дотичних напружень $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ то для визначення напруженого стану елемента необхідні тільки шість незалежних компонент напружень і тензор буде симетричним [3].

Деформаційний стан характеризує тензор деформацій

$$\varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy}/2 & \gamma_{xz}/2 \\ \gamma_{yx}/2 & \varepsilon_y & \gamma_{yz}/2 \\ \gamma_{zx}/2 & \gamma_{zy}/2 & \varepsilon_z \end{vmatrix} \quad (2.2)$$

де ε, γ – відповідно лінійна і кутова деформації.

Вирази тензорів напружень і деформацій спрощуються, оскільки, матеріали часто розглядають як ізотропні (механічні властивості яких однакові у всіх напрямках), їх течія відбувається тільки в одному напрямку. При обробці структурованих дисперсних систем в машинах і апаратах практично існують дотичні напруження і деформації зсуву. Навіть при деформаціях розтягу, стискання, кручення поряд із зовнішніми змінами форми сердовища відбуваються зміни структури. При цьому виникають не тільки дотичні, а й нормальні напруження, причому в структурах з вираженими еластичними властивостями (що характерно для борошняного тіста). Нормальні напруження можуть досягати значень, які перевищують відповідні значення дотичних напружень. Це явище, вперше відмічене Вайссенбергом, що є предметом досліджень різних вчених, погляди яких значно відрізняються [4].

Реологічні властивості якісно і кількісно визначають поведінку продукту під впливом зовнішніх факторів і дозволяють зв'язати між собою напруження, деформації у процесі прикладання зусилля.

Деформаційний стан реальних дисперсних систем, до яких відносяться харчові маси, можна охарактеризувати так званою кривою течії. Ця крива будується за експериментальними даними в координатах: напруження зсуву – швидкість зсуву. У загальному вигляді цю залежність (див. розділ 1) можна записати як:

$$\tau = f(\dot{\gamma}), \text{ або } \dot{\gamma} = \varphi(\tau). \quad (2.3)$$

Це рівняння застосовується для реальних систем, які можуть бути або рідинами або твердими матеріалами. Криві течії рідин виходять з початку координат (рис. 2.1). З цього випливає, що рідина є середовищем і піддається деформації незалежно від величини в'язкості при малому прикладеному зовнішньому зусиллі. В результаті прикладених зусиль такі системи можуть текти, проявляючи властивості рідин. Вони появляються після перевищення дотичним напруженням деякої критичної величини – граничного напруження зсуву τ_0 , що визначає пластичні властивості матеріалу.

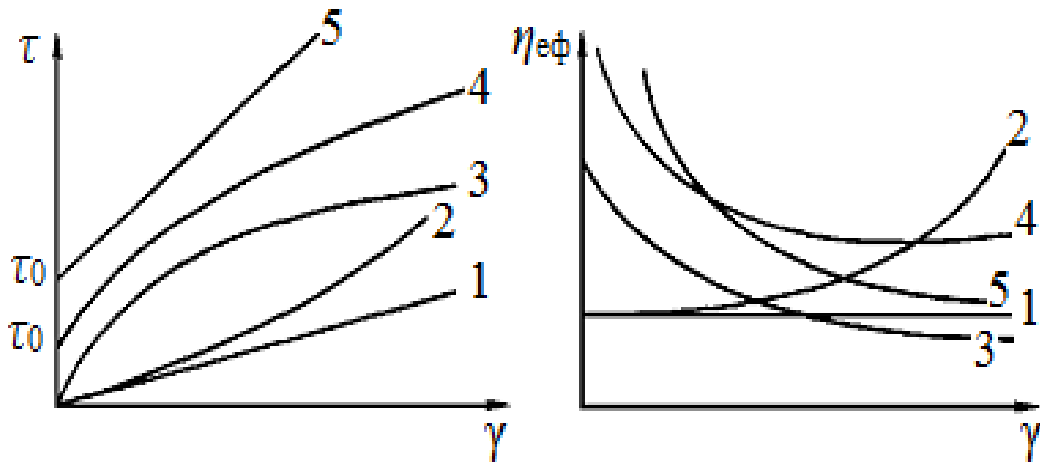


Рис. 2.1. Криві течії: 1 – ньютонівської рідини; 2 – дилатантної рідини; 3 – структурно-в'язкої рідини; 4 – нелінійного пластичного тіла; 5 – лінійного пластичного тіла.

Криві течії ньютонівських рідин являють собою пряму лінію 1, що проходить через початок координат. Для таких рідин застосовується реологічне рівняння Ньютона:

$$\tau = \eta / \dot{\gamma}. \quad (2.4)$$

Всі криві течії (2...5), що відхиляються від прямої лінії – є неньютонівськими рідинами. Неньютонівська поведінка рідин може мати різні причини: в рідких дисперсних системах визначальну роль відіграє орієнтація частинок дисперсної фази, зміна їх форми і ступеня агрегації, в колоїдних рідинах – поступове заглиблення із зростанням напружень руйнування внутрішньої структури; в полімерах – ефекти механічної релаксації, тобто перерозподілу напружень. Окремий випадок неньютоновської поведінки рідини – зміна в'язкості з плином часу через перебіг у середовищі хімічних реакцій. Якщо реакція проходить в гомогенному середовищі, зміна в'язкості середовища відображає зміну її складу, при цьому деформування не впливає на кінетичні закономірності реакції.

Серед харчових рідин існують такі, у яких в'язкість змінюється від швидкості деформування. Такі рідини визначаються реологічним рівнянням Оствальда-де-Віля:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n, \quad (2.5)$$

де K – коефіцієнт консистенції, залежний як від природи матеріалу, так і від виду і геометрії вимірювальних елементів приладу;
 n – індекс течії.

$$n = \frac{d \lg \tau}{d \lg \dot{\gamma}} \quad (2.6)$$

При цьому крива 2 характеризує дилатантну течію (при $n > 1$), характерну в основному для концентрованих дисперсних систем, при якій зі збільшенням швидкості деформації відбувається підвищення в'язкості;

крива 3 (рис. 2.1) описує псевдопластичну течію (при $0 < n < 1$), внаслідок руйнування структури зі збільшенням швидкості деформації;

крива 4 (рис. 2.1) показує нелінійну пластичну течію, характерну для більшості пластичних тіл після досягнення граничного напруження зсуву τ_0 , реологічне рівняння Гершеля - Балклі описує їх поведінку:

$$\tau = \tau_0 + B_0^* \dot{\gamma}^n \quad (2.7)$$

Лінійна залежність 5 (рис. 2.1) характерна для бінгамівських тіл і відповідає ідеальній пластичній течії, у яких після досягнення граничного напруження зсуву τ_0 спостерігається пропорційність між швидкістю і напруженням зсуву. Такі матеріали описуються рівнянням Бінгама:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{\text{пл}} \dot{\gamma} \quad (2.8)$$

де $\eta_{\text{пл}}$ – пластична в'язкість, Па·с.

В'язкість – міра опору течії, яка є основною властивістю для рідких тіл, а також для пластичних тіл після перевищення межі текучості. Для неньютонівських рідин в'язкість є функцією швидкості зсуву, тому її називають «уявною», або ефективною в'язкістю $\eta_{\text{еф}}$ [Па·с]. Для неньютонівських рідин ефективна в'язкість складається з двох компонентів:

1) ньютонівської в'язкості η , яка заснована на внутрішньому терті та представляє фізичну константу матеріалу;

2) структурного опору, який залежить від структурного стану дисперсних систем і є функцією швидкості зсуву.

Ефективна в'язкість η_{ef} є підсумковою змінною характеристикою, яка описує рівноважний стан між процесами відновлення і руйнування структури в сталому потоці і залежить від змін градієнта швидкості і напруження зсуву.

У реології виділяють два види течії:

1) в'язка течія – реалізується в істинно в'язких, ньютонівських рідинах при будь-яких малих напруженнях зсуву τ . Ця течія описується рівнянням Ньютона:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\epsilon} \quad \text{або} \quad F = \eta \cdot A \cdot \frac{du}{dy}, \quad (2.9)$$

де η – коефіцієнт динамічної або абсолютної в'язкості, що характеризує величину зусиль, які виникають між двома елементарними шарами рідини при їх відносному зсуві, Па·с;

F – сила опору між двома елементарними шарами, Н;

A – площа поверхні опору цих шарів, м²;

2) пластична течія – течія при величині напруження τ , рівного межі плинності τ_T .

Для характеристики дисперсних структур в умовах руйнування структури користуються методикою $\tau(\gamma)$ при $\dot{\gamma} = \text{const}$. На її основі можна побудувати повні реологічні криві течії структурованих дисперсних систем в координатах $\gamma(\tau)$, $\eta(\tau)$, $\eta(\dot{\gamma})$ [4]. Однак для отримання початкової ділянки повної реологічної кривої, яка характеризується найбільшою в'язкістю практично незруйнованої структури, можна користуватися методикою $\dot{\gamma}(\tau)$ при $\tau = \text{const}$. В загальному вигляді повна крива течії $\dot{\gamma}(\tau)$ має S-подібний характер (рис. 2.2) і умовно розбивається на певні ділянки, обмежені характерними значеннями напружень. Крива течії може бути отримана для таких коагуляційних структур, в яких зберігаються здатність до повного тиксотропного відновлення після руйнування [5].

Нижче умовної статичної межі текучості τ_{k1} , течії не спостерігається при найбільшій можливій тривалості вимірів, тобто в'язкість і період релаксації в зоні $\tau < \tau_{k1}$ (пружній зоні) вважаються безмежно великими. При накладанні напружень $\tau_{k1} \leq \tau < \tau_r'$ (до умовної межі практично незруйнованої структури τ_r'), відбувається дуже повільна течія типу повзучості. Для системи характерна максимальна в'язкість практично незруйнованої структури η_0 , що відповідає лінійній ділянці 0–1 (див. рис. 2.2.). При подальшому збільшенні напруження

до $\tau_{к2}$ відбувається руйнування жорсткого каркаса і в'язкість структури стрибкоподібно зменшується (ділянка 1–2).

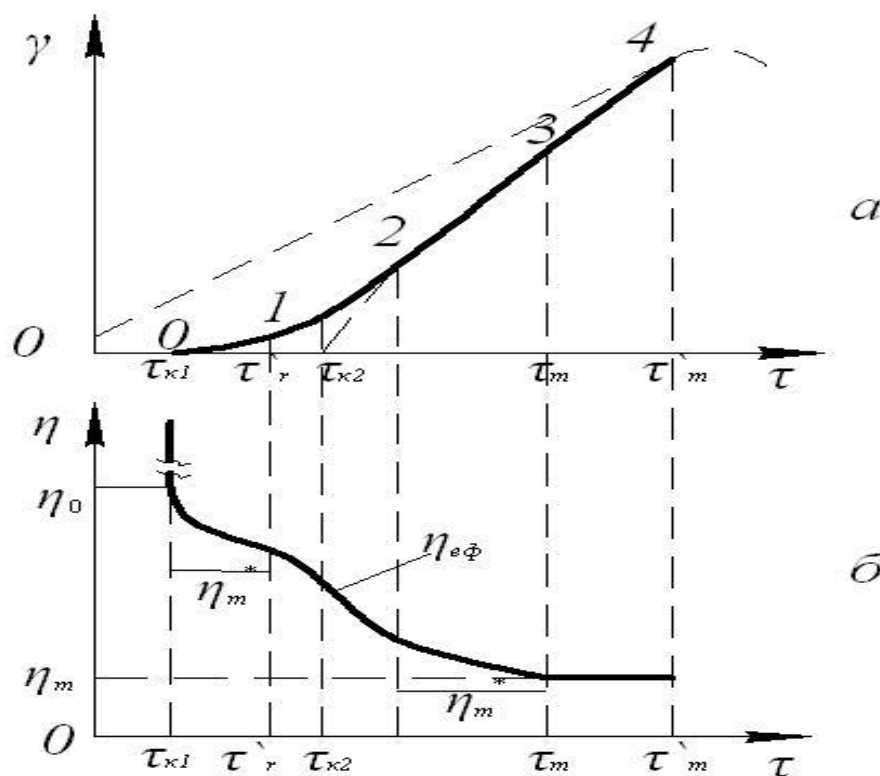


Рис. 2.2. Залежність швидкості деформації: а) і в'язкості; б) неньютонівського тіла від напруження

Зона пластично-в'язкої течії 2–3 характеризується достатньо постійною в'язкістю. Тут поряд із руйнуванням структури відбуваються і процеси її відновлення: при безперервному деформуванні течія супроводжується розпадом структури на агрегати з часток і одночасно виникають нові агрегати. Причиною цього є ефект орієнтації молекул матеріалу в напрямку течії, випрямлення їх спіралеподібної форми і, як наслідок, утворення додаткових зв'язків.

При перевищенні умовної межі гранично зруйнованої структури τ_m (ділянка 3–4) система характеризується найменшою в'язкістю гранично зруйнованої структури η_m . Така течія виникає при максимальній швидкості деформації і супроводжується розпадом структури на «первинні» частки [6]. В точці 4 може починатись турбулізація потоку і ускладнення законів течії.

Ефективна в'язкість, яку отримують по повній реологічній кривій, вважається основною характеристикою структурно-механічних властивостей

дисперсних систем. Саме вона описує рівноважний стан між процесами руйнування і відновлення структури в усталеному потоці [4].

Крива течії дисперсних систем характеризує ступінь рівноважного руйнування структури від інтенсивності механічних впливів у всьому можливому діапазоні зміни ефективної в'язкості $\eta_{\text{ef}}=f(\tau)$ [5]. Численні експериментальні факти підтверджують, що на кривих течії різних матеріалів існують ділянки, де залежність $\gamma(\tau)$ лінійна, а значить пластична в'язкість постійна (див. рис. 2.2, зони 0–1 і 2–3). З цього випливає, що єдиної формули, яка охоплює всі режими течії і не суперечить наявності лінійних ділянок на реологічній кривій, не може існувати. Жодна формула при скінчених значеннях γ не може в одному інтервалі давати лінійну, а в іншому – нелінійну залежність [7]. Для практичних потреб немає необхідності будувати повну криву течії, адже, як правило, заздалегідь відомі межі напружень і швидкостей деформацій, характерні для даного технологічного процесу. Тому в літературі наводяться експериментальні залежності, наприклад, в'язкості, із вказівкою меж швидкостей деформацій, в яких запропонована формула може застосовуватися. Взагалі, структуровані дисперсні системи не можуть характеризуватися одним значенням ефективної в'язкості без зазначення швидкості зсуву або напруження [4].

Отже, для визначення реологічних характеристик необхідно побудувати експериментальні криві течії. Проводячи математичну обробку дослідних даних, можна отримати аналітичний вираз реологічного рівняння досліджуваного матеріалу. Коефіцієнти цього рівняння і будуть являтися реологічними характеристиками, які потрібні для розрахунків машин.

2.1.1. Зв'язок конструктивних параметрів машини з реологічними особливостями середовища

Проведена в останні роки реконструкція формувальних та інших машин з валковими робочими органами в харчовій галузі була спрямована на удосконалення їх компоновки і форми робочих органів. Одночасно винахідники спрямовували пошук на підвищення надійності і довговічності. Для удосконалення конструкції і розробки принципово нових машин потрібні глибокі знання всіх тонкощів процесу, його математичний опис. Це дозволить прогнозувати і розрахувати роботу машини на основі залежностей, одержаних із загальної теорії процесу і його моделі. При розрахунку даних машин основні труднощі виникають із-за непостійності швидкості переміщення тіста, а

відповідно і зсувних деформацій. вплив його якісних показників на готову продукцію.

В роботах [4, 5, 6] розглянуто деякі напрямки, що пов'язані із конструюванням нових машин та модернізацією старих. Особливу увагу приділялося вибору оптимальних технологічних режимів, що можуть бути вирішені за допомогою кривих текучості. Встановлено [7, 8], що методи і засоби визначення реологічних характеристик при різних видах деформації, а також деякі приклади розрахунків технологічних процесів і обладнання спрямовують на дослідження фізико-механічних властивостей тіста. Такий підхід дозволяє удосконалити та інтенсифікувати технологічний процес, розробити науково обґрунтовані методи розрахунку обладнання, створення принципово нових машин. Тому при дослідженні процесів необхідно встановити взаємозв'язок між технологічними, конструктивними характеристиками тіста.

Реологічні моделі дозволяють вирішити гідродинаміку середовища, течію в каналі нагнітання, вплив геометрії камери на розхідно-напорну характеристику процесу. Такий основний підхід ґрунтується на виборі реологічної моделі, що найбільш реальна для рішення задачі при формуванні напівфабрикатів та виробів.

Серед комплексу фізичних властивостей різних середовищ реологічні (структурно-механічні) властивості є найважливішими. Вони часто передбачають стан середовищ в найрізноманітніших технологічних процесах і енергетичних полях та характеризують агрегатний стан, дисперсність, будову, структуру і вид взаємодії [1, 2, 3].

Вихідною сировиною для виробництва кондитерської борошняної продукції є борошно різних сортів, яке в силу біологічних, фізичних і механічних факторів змінює свої властивості і набуває характерних для даного виду продукту властивостей. Процес їх виробництва можна розглядати як сукупність процесів зміни реологічних характеристик утвореного напівфабрикату згідно рецептури під дією біологічних, фізичних і механічних чинників. З іншого боку зміна реологічних характеристик впливає на вибір конструкції і режими роботи обладнання.

Основними початковими технологічними процесами виробництва кондитерської борошняної продукції є змішування компонентів та їх формування. Створення сучасних енерго і ресурсозберігаючих машин для замішування і обробки напівфабрикатів повинна базуватись на врахуванні структурно-механічних властивостей.

З точки зору реології дисперсні системи можна розділити на золі, які ведуть себе як рідини, на студні, які мають властивості твердих тіл, і на гелі, які займають проміжне положення. Дисперсійним середовищем є неперервна фаза, а дисперсним середовищем є роздрібнена, яка складається з частин, що не контактують одна з одною. При цьому під фазою розуміють сукупність гомогенних частин системи, обмежених від інших фізичними поверхнями розділу.

Особливістю виробництва борошняної продукції є зміна фаз і перехід від одного виду дисперсного середовища до іншого на різних етапах технологічного процесу. При цьому напівфабрикат із борошна може бути як дисперсійною фазою так і дисперсною. Структуру напівфабрикату, тобто внутрішню будову і характер взаємодії між окремими елементами суміші визначає їх хімічний склад, температура, дисперсність та інші технологічні фактори. Класифікація борошняно-кондитерських напівфабрикатів базується на основних первинних тілах – пружне (модель пружина), пластинчасте (модель пара тертя ковзання) і в'язке (модель поршень з отворами і циліндр).

Процес виробництва борошняно-кондитерських виробів можна представити як процес зміни форми зв'язку вологи з білком. За класифікацією Ребіндера розрізняють три основних форми зв'язку вологи з продуктом: хімічну, яка обумовлена іонною або молекулярною взаємодією в точних кількісних співвідношеннях; фізико-хімічну вологу, обумовлену адсорбцією вологи в гідратних оболонках або ту, яка осмотично утримується в клітинах в не строго визначених співвідношеннях; фізико-хімічну вологу, яка утримується в комірках структури, в мікро і макрокапілярах і прилипає до поверхні тіла в невизначеній кількості. Крім цього є ще вільна волога, яка не зв'язана з продуктом.

З цієї точки зору, якщо не враховувати біологічні процеси, які проходять у напівфабрикаті при виробництві борошняно-кондитерських виробів, процес можна представити, як зміну форми зв'язку вологи з білковими структурами в результаті дії біологічних і механічних чинників.

Так фізико-хімічно зв'язана волога в результаті термообробки частково переходить у вільну вологу при механічному руйнуванні структури і нагріванні, частково залишається хімічно зв'язаною, частково утримується в комірках структури. Вільна волога відводиться в результаті дії сил гравітації і надлишкового тиску. По мірі відділення вологи зростає механічна міцність структури і тісто переходить з колоїдного стану в капілярно-пористий.

За останні роки прикладна реологія дисперсних систем має значний розвиток в роботах вітчизняних і зарубіжних учених. Роботами академіка П. А. Ребиндера і його школи були закладені основи нового напрямку – фізико-хімічної механіки.

Розуміння фізичної поведінки середовища при його обробці в робочих каналах механічного устаткування визначає дію різних зусиль і їх комбінацій, у тому числі об'ємного стиснення, одноосного розтягування, простого зсуву, стиснення із зсувом.

Середовище, що переробляється, як відомо, може знаходитися в твердому, рідкому, газоподібному станах і проявляти при деформації в'язкі, пластичні, в'язко-пластичні, пружні, в'язко-пластично-пружні властивості. У кожному конкретному випадку важливо знати характер зв'язку прикладених зусиль і деформації матеріалу, що виникає в робочому каналі машини утвореного між обертовими валками.

Для числового визначення параметрів реологій високов'язких пластичних матеріалів розроблені методи і засоби. Проте через специфічні властивості в'язко-пластичних матеріалів ці прилади часто виявляються непридатними для досліджень реологій. Характеристику реології в'язко-пластичного матеріалу, як правило, одержують у вигляді графіка залежності в'язкості (або напруги зсуву) від градієнта швидкості. З точністю, достатньою для інженерних цілей, можуть бути одержані відомості про поведінку матеріалу в процесі деформації, якщо скористатися поняттям ефективної (аномальної) в'язкості.

Аномалія в'язкості була знайдена Ф. Н. Шведовим і полягала в тому, що заміряна в'язкість зменшувалася із збільшенням градієнта швидкості всупереч існуючому уявленню про постійність цього коефіцієнта у формулі Ньютона. Ефективною в'язкістю дуже зручно користуватися, оскільки це дає можливість замість 20 критеріїв, що описують поведінку в'язко-пластичних середовищ при їх деформації, користуватися практично залежністю $\mu_{ef} = f(\dot{\gamma})$.

Всі матеріали в ідеальному випадку володіють повним набором реологічних властивостей, однак з практичної точки зору при даному наборі умов їх можна класифікувати, як наведено в табл. 2.1. [9]

Пшеничне дріжджове тісто належить до неньютнівських матеріалів. У відповідності із загальноприйнятою класифікацією [8, 9], їх поділяють на рідини, властивості яких не залежать від тривалості зсуву (бінгамівські, псевдопластичні, дилатентні); рідини, властивості яких залежать від тривалос-

ті зсуву (тиксотропні та реопексні) та рідини, які демонструють властивості твердого тіла. У табл. 2.2 наведено властивості неньютонівських рідин, які були використані попередніми дослідниками для визначення поведінки пшеничного дріжджового тіста.

Таблиця 2.1.

Класифікація матеріалів

Реологічна поведінка	Тип	Рівняння	Примітка
Тверді тіла:			
– абсолютно жорстке	Евклідовий	$\gamma = 0$	
– пружні	Тіло Гука Нелінійна поведінка	$\tau = G \cdot \gamma$ $\tau = G(\gamma) \cdot \gamma$	G – модуль Юнга
В'язкопружні:			
– ідеальні рідини	Паскалевий	$\tau = 0$	
– лінійні в'язкі рідини	Ньютонівський	$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$	μ – в'язкість
– нелінійні в'язкі рідини	Неньютонівський	$\tau = \eta(\dot{\gamma}, t) \cdot \dot{\gamma}$	η – уявна в'язкість; t – час
– в'язкі тверді тіла	Максвела Кельвіна	$\sigma + \lambda d\sigma/dt = \eta d\gamma/dt$ $\frac{d\gamma}{dt} + \frac{\sigma}{\lambda} = \frac{\sigma}{\eta}$	$\lambda = \eta / G$ (період релаксації)

Борошняне тісто, яке є колоїдною дисперсною системою, належить до твердо-рідких тіл, маючи одночасно пружно-еластичні й пластично-в'язкі властивості [8]. Таким чином, найбільш коректно описують поведінку пшеничного дріжджового тіста моделі, в яких враховані, як властивості твердого тіла (пластичність), так і рідкого (в'язкість). Ці властивості по-різному проявляються на стадіях обробки тіста. Однак, через складність розв'язання таких моделей і необхідність експериментально визначати параметри, вони не набули суттєвого поширення. Більшість дослідників процесів поділу і формування пшеничного дріжджового тіста звертають увагу

на його тиксотропні властивості [5, 8]. Однак для опису гідродинамічних властивостей течії тіста переважна більшість науковців використовують досить просте, але таке, що достатньо повно описує властивості тіста, рівняння Гершеля-Балклі [10, 11]. При цьому потребують експериментального визначення параметри початкового напруження зсуву τ_0 , коефіцієнту консистенції K та індексу течії n (див. табл. 2.2).

Таблиця 2.2.

Рідини, властивості яких не залежать від тривалості зсуву

Тип	Формула	Графічна залежність	Примітка
1	2	3	4
Рідини, властивості яких не залежать від тривалості зсуву			
пластичні	<p>Шведова – Бінгама:</p> $\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma},$ <p>τ_0 – границя текучості.</p>		<p>Опір зсуву складається з постійного і в'язкісного опорів.</p>
псевдопластичні	<p>Оствальда:</p> $\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$ <p>Гершеля – Балклі:</p> $\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n,$ <p>де k – коефіцієнт консистенції, Па·сⁿ; n – індекс течії, характеризує ступінь неньютонівської поведінки матеріалу.</p>		<p>$0 < n < 1$</p> <p>Під дією сил, що викликають зсув, відбувається орієнтація частинок в напрямку течії. З підвищенням швидкості зменшується взаємодія між частинками [12], внаслідок чого зменшується в'язкість</p> <p>* Інші залежності для опису матеріалів, властивості яких не залежать від тривалості зсуву, наведено в додатку А.</p>

Закінчення таблиці 2.2.

Рідини, властивості яких залежать від тривалості зсуву			
1	2	3	4
тиксотропні	<p>Модифіковане тіло Бінгама:</p> $\tau = \tau_e + (\tau_0 - \tau_e)\exp(-K \cdot t),$ <p>де τ_e – рівноважне значення τ, яке досягається після достатньо тривалого часу зсуву, Па; τ_0 – початкове напруження зсуву, Па; K – параметр, що визначається, с^{-1}; t – тривалість зсуву, с.</p>		<p>При постійній швидкості зсуву значення напруження змінюється з часом, а структура руйнується [15]. Процес обернений.</p>

2.1.2. Обґрунтування параметрів, що відбуваються в робочих камерах машин з валковими робочими органами

При формуванні вибродженого (хлібного) та прісного (макаронного) тіста відбуваються різні процеси. Тому таке тісто втрачає значну частину газів, зменшується в об'ємі, ущільнюється. Хлібне тісто стискається до 0,5 МПа і більше.

Процеси, що відбуваються в робочій камері машини здійснюються циклічно за порівняно короткий час, що обмежується секундами або їх долями. При аналізі треба враховувати лише ті процеси, які за час робочого циклу впливають на властивості тіста або сам процес. Короткочасний вплив тиску та механічного перемішування істотно впливають на структуру, фізико-механічні властивості тіста та характер при наступних етапах технологічного процесу: вистоюванні та випіканні.

При дії тиску на зброжене тісто, в ньому зменшується об'єм газової фази та проходить поглинання частини газу тістом, а при одночасному інтенсивному механічному перемішуванні газові бульбашки поділяються на менші, що сприяє утворенню рівномірної мікропористої структури та видаленню великих бульбашок. Така структура спроможна краще утримувати газове середовище на наступних етапах технологічного процесу.

Однак, при виборі раціонального значення робочого тиску, необхідно враховувати той факт, що при зниженні робочого тиску з 0,2 до 0,1 МПа досягається краща комбінація показників якості тіста, знижуються потужність приводного електродвигуна та витрати енергії приблизно на 30 %, майже вдвічі зменшується об'єм максимальних навантажень на всі рухомі елементи машини, значно підвищуються довговічність та безвідмовність роботи тістоподільної машини. Тому, раціональним тиском у робочій камері прийнято значення 0,1 МПа, при якому досягається найкраща комбінація показників роботи.

Залежність густини (об'ємної маси) тіста ρ від величини тиску P (рис. 2.3) напершому етапі зростання тиску нелінійна і майже прямолінійна (з мінімальним нахилом до осі абсцис) при подальшому збільшенні тиску. Тісто, яке поступає на формування має допустимі коливання технологічних і структурно-механічних властивостей, що є причиною зміни тиску ΔP в робочій камері.

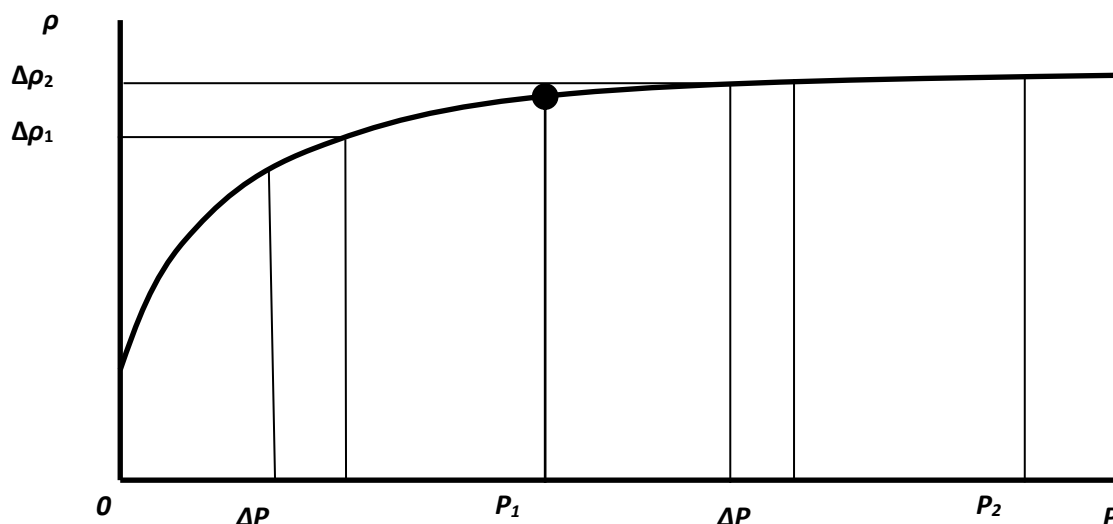


Рис. 2.3. Залежність густини тіста від величини тиску

Якщо на графіку залежності $\rho = f(p)$ нанести умовну точку переходу криволінійної ділянки до прямолінійної і відповідне їй значення P_1 , то очевидно, що притисках у вузлі нагнітання машини в діапазоні $[0 - P_1]$ існуючі коливання тиску ΔP викличуть значні зміни густини напівфабрикату $\Delta\rho_1$. Якщо тиск в процесі нагнітання буде в діапазоні $[P_1 - P_2]$, що відповідає прямолінійній ділянці на графіку залежності $\rho = f(p)$, то коливання густини напівфабрикату $\Delta\rho_2$ будуть помітно меншими. Так як валки працюють за об'ємним принципом, то зазначене зниження ΔP сприятиме істотному скороченню величини похибки маси шматків.

Таким чином, у якості робочого діапазону тисків слід вибрати ділянку $[P_1 - P_2]$. Величина P_2 відповідає гранично допустимому тиску за умовою збереження незруйнованої структури напівфабрикату. Не менш важливо враховувати також і ту обставину, що одночасно із зміцненням клейковини і зниженням текучості сформованих тістових заготовок, збільшення тиску певних значень, викликає зниження бродильної активності дріжджів і, як наслідок, зменшення об'ємного виходу бубликів.

Інтенсивність обробки тістав подільнику із валками, крім робочого тиску, характеризується коефіцієнтом стиснення тіста в робочій камері K_4 . Залежно від кратності стиснення, тісто піддається різним впливам, які заключаються в механічному перемішуванні і багаторазовому стисканні до певного тиску. Великою мірою коефіцієнт залежить від конструкції валка, його інтенсивної дії на тісто та досконалості робочого процесу. Зокрема орієнтовне значення K_4 при неінтенсивному (тихохідному валковому, лопатевому) – близько 10. Для сучасних моделей машин значення K_4 слід корегувати з врахуванням прийнятої конструкції нагнітача та схеми подільника.

З вище наведеного випливає, що необхідною умовою отримання постійного ступеню ущільнення тіста є стала величина тиску на тісто в кінці кожного циклу нагнітання протягом всього періоду роботи машини. При цьому заготовки однакового об'єму матимуть однакову масу.

Графічно нагнітання тіста можна показати таким чином (рис. 2.4). За вертикальної осі відкладають силу нагнітання P , по горизонтальній – деформацію напівфабрикату h (величина зазору). Деформаційна поведінка напівфабрикату описується кривою ОА.

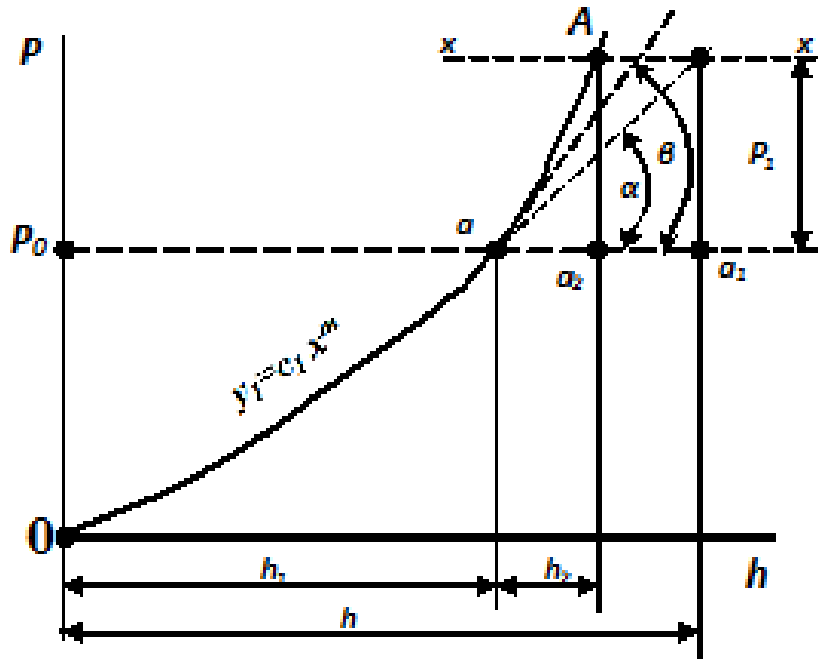


Рис. 2.4. Графік нагнітання тіста при використанні валків

Напівфабрикат починає нагнітатися в міжвалковий простір під дією початкової сили P_0 пружного протитиску з боку тіста. У міру його заповнення деформація напівфабрикату збільшується і його пружний опір зростає. В точці **a** кривої OA сила протидії напівфабрикату дорівнює початковій силі пружно-пластичного тіста P_0 . У цей обертовий момент валка h_1 , дорівнює початковій деформації напівфабрикату. Надалі відбувається ущільнення тіста та його транспортування. Тісто деформується по криволінійному закону (крива aA). Сила P_1 викликає додаткову деформацію тіста aa_2 .

Мала величина додаткової деформації матеріалу aa_2 пояснюється тим, що при її закінченні жорсткість напівфабрикату, дорівнює $c_1 = \operatorname{tg} \beta$. Так як деформація пропорційна до навантаження і обернено пропорційна до жорсткості, то одна і та ж додаткова сила P_1 при різних жорсткостях тістового напівфабрикату викликає порівняно малу деформацію оброблюваного матеріалу. Таким чином, основне стиснення тіста в процесі нагнітання здійснюється силою P_0 , а додаткове- зусиллям P_1 .

Таким чином, шляхом порівняння кривої реології досліджуваного середовища з кривою вивченою реології, можна на підставі графіка не тільки якісно оцінити деформуючі властивості матеріалу, що цікавлять нас, але, враховуючи однозначну залежність зусиль, що виникають у вузлах машин, від в'язкості матеріалу і їх геометричних характеристик, графічно визначити

орієнтовну величину основних параметрів цих машин, що є початковими при їх подальших розрахунках.

2.2. Моделювання руху рідин, як спосіб обґрунтування дії робочих органів

Дослідження фізичних процесів, що відбуваються у тих чи інших технічних пристроях, у тому числі й з валковими робочими органами, можна виконати трьома шляхами [17]:

- експериментом на натурному виробі (фізичне моделювання на натурному об'єкті);
- експериментом на моделі, що має ту саму природу, що й натурний об'єкт (фізичне моделювання на фізичній моделі);
- математичним моделюванням, тобто розв'язанням системи рівнянь, які описують робочі процеси об'єкта, що моделюється;
- комп'ютерне моделювання за допомогою програмних пакетів.

Математичним моделюванням називають не лише сам процес складання математичної моделі, а й процес розв'язання (чисельний експеримент на математичній моделі) [9, 13].

Перший із зазначених шляхів дослідження валкових робочих органів видається найбільш трудомістким і для отримання узагальнених даних вимагає значних часових затрат та дорогого експериментального обладнання. Математичний експеримент на математичній моделі пришвидшує отримання шуканих результатів і не виключає методів фізичного моделювання з метою встановлення адекватності математичної моделі та натурального об'єкта.

Математичне моделювання елементів машин з валковими робочими органами чи нагнітача в цілому може розглядатись у вигляді двох основних завдань:

- синтезу (проектування, конструювання) об'єкта з оптимізацією конструктивних та режимних параметрів і прогнозування їх характеристик;
- аналізу роботи існуючих установок або їх елементів за допомогою математичної моделі, отриманої на основі заданих конструктивних характеристик.

Спільне або окреме використання цих двох підходів у тій чи іншій мірі дозволяє розв'язувати необмежене коло задач проектування, відшукувати приховані резерви вдосконалення конструкції валків. Стосовно валкового РО, створення математичної моделі пов'язане з деякими труднощами, що виникають завдяки наявності таких особливостей, як:

- робоче середовище, що знаходяться у різних взаємодіях з поверхнею валків, частково змінює свої властивості;
- нестационарність потоку середовища за кутом повороту робочого органу;
- невизначеність (розмитість) меж взаємодії між рідиною та газом;
- невизначеність меж взаємодії між верхнім і нижнім шаром рухомого середовища;
- невизначеність зміни тиску середовища за кутом повороту валкового робочого органу.

Математичне моделювання робочого нагнітання тіста вперше було описане у працях Мачихіна [4, 12]. Принциповим у даному випадку є те, що Мачихін, який був спеціалістом у галузі інженерної реології, із самого початку заклав у опис робочого процесу вплив валків на тісто при зміні зазору. Суть цієї моделі полягає у тому, що валки, що обертаються, є динамічною ланкою у ланцюгу зміни тиску тільки для бубличного тіста.

2.2.1. Реологічні властивості тіста, що визначають вимоги до геометрії валків

Серед неньютонівських рідин зустрічаються матеріали, різноманітні за своїми реологічними властивостями. В одного і того самого матеріалу залежно від його стану і умов навантаження виявляються різні реологічні властивості. Відомо багато випадків, коли в процесі технологічної обробки один і той самий продукт переходить із одного реологічного стану в інший, часто протилежний за своїми властивостями до першого. Саме тому вдосконалення усього технологічного комплексу неможливе без врахування реологічних властивостей речовин в тому діапазоні напружень (зсуву), які застосовуються в технологічних апаратах. Дані реологічних вимірювань дають змогу інтенсифікувати технологічні процеси і забезпечують необхідний об'єм виробництва продукції з одночасним покращенням їх якості.

Вимірювання реологічних параметрів утвореного тіста на різних стадіях процесу обробки (нагнітання, розділення, формування, розкатування) дає змогу керувати технологічними показниками, здійснювати розрахунок режимних та експлуатаційних характеристик обладнання [21] Тому необхідно дотримуватись основних закономірностей:

- Інженерних розрахунків технологічного обладнання, насамперед таких, як машини з валковими робочими органами;
- Визначення функціональних можливостей тіста під час нагнітання;
- Контроль якості напівфабрикату та якості готової продукції;

- Оцінка структури тіста з кореляцією його якісних показників;
- Аналіз реологічних рівнянь стану або фундаментальних рівнянь.

Отже, при проведенні технологічних процесів в робочих камерах машин, що містять достатню кількість включень дисперсного середовища, всі явища можуть бути розглянуті з точки зору фізико-хімічних властивостей, що визначають швидкість його протікання на молекулярному рівні і в локальному обсязі робочої камери машини. Тому вивчення явищ, що протікають в робочій камері машини, або на окремих її стадіях, визначається в основному гідродинамічною структурою потоків. В даному випадку, основу моделювання процесів дії обертових валків на середовище, складають математичні описи структури потоків за допомогою типових гідродинамічних моделей [1, 2, 3, 4]. Це модель ідеального перемішування, модель ідеального витіснення, однопараметричні і двохпараметричні дифузійні моделі, осередкова модель.

Огляд досліджень, присвячених питанням гідродинаміки рідинних плівок показав, що істотний внесок у вирішення даної проблеми, пов'язаної із течією ньютонівських рідин внесли такі вчені, як Алексеєнко А. В., Накоряков В. Е., Покусаєв Б. М., Шкадов В. Я, Малюсов В. А., Живайкін Л. Я., Воронцов Е. Г., Капіца П. Л., Левич В. Г., Холпанов Л. П., Тананайко Ю. М., Фулфорд Г. Д., Бояджиєв Х., Бешков В. та інші. В основному роботи цих авторів присвячені течії по плоских і циліндричних поверхнях. Що стосується неньютонівських рідин то, на жаль, навіть для опису течії на плоских вертикальних і похилих поверхнях досліджень надзвичайно мало. Серед них слід відзначити роботи Шульмана З. П. де зроблена спроба описати течію рідин, що підлягають степеневому закону Освальда де Віля, на плоских вертикальних і похилих поверхнях. Разом з тим, проведений аналіз показав, що серйозні дослідження течії неньютонівських рідин на поверхнях із кривизною, що змінюється, уздовж утворюючої, практично відсутні, у той час, як саме такі поверхні все частіше зустрічаються в машинах і технологічних процесах переробної, фармацевтичної, харчової та інших видах промисловості.

Серед різних видів деформації – зсуву, розтягу, стиску, згину, кручення – всі, за винятком зсуву, крім зовнішніх змін форми, супроводжуються змінами внутрішнього розташування часточок тіла шляхом простих деформацій зсуву [5]. Оскільки середовища (борошняне тісто, кондитерські, фармацевтичні суміші та ін.) мають високу пластичність, його механічні властивості описують деформаціями зсуву при дії дотичних напружень.

Однак у структурах з яскраво вираженими еластичними властивостями та значними величинами граничних пружних деформацій, що характерно для

вище згаданого середовища, виникають нормальні напруження, які можуть на порядок перевищувати дотичні при збільшенні градієнта швидкості деформації $\dot{\gamma}$. Вперше це явище виявив Вайсенберг [6], а в подальшому воно експериментально досліджувалось в ряді робіт [7–13].

Для ньютонівських (в'язких) рідин при малих напруженнях зсуву реалізується в'язка течія. В'язкість таких рідин не залежить від швидкості зсуву, а є функцією температури і тиску в даній системі [12]. На відміну від них, в'язкість неньютонівських матеріалів є функцією швидкості зсуву та тривалості дії сили.

На процес переміщення тіста валками суттєво впливають параметри як в'язкість та величина індексу течії n в рівнянні руху, що описує поведінку неньютонівської псевдопластичної рідини. На сьогодні ще недостатньо повно досліджена зміна реологічних та гідродинамічних характеристик тіста під час деформацій, так як визначити швидкості деформації зсуву одночасно в кожній точці робочої камери неможливо. Параметр n , який характеризує ступінь неньютонівської поведінки матеріалу, важливий для розуміння та точного опису процесів, що відбуваються при русі тіста. Механічний вплив на тісто може відбуватися в широкому діапазоні швидкостей деформації. Це неминуче впливає на реологічні властивості тіста, іноді на 1...2 порядки змінюючи їх. Обмеження значення параметру нелінійності одним чисельним значенням вже не дає повної картини поведінки тіста під час його обробки. Тому актуальним стає питання про його уточнення.

В'язкість неньютонівських рідин та індекс течії n залежать від швидкості деформації зсуву [13]. Тому є доцільним визначити взаємні залежності названих параметрів для отримання даних про виникнення течії в міжвалковому просторі при дії валків на тісто.

Так в своїх дослідженнях [8, 16], автором були оброблені дані за допомогою програми CurveExpertProfessional 2.0.3, яка дозволяє одночасно визначити як функціональні залежності між величинами (η і $\dot{\gamma}$), так і коефіцієнти кореляції r . Встановлено, що в'язкість тіста залежить від швидкості деформації зсуву нелінійно:

$$\eta = 206 / \dot{\gamma}^{0.45}.$$

Так як тісто характеризується невеликими значеннями граничного напруження зсуву τ_0 і функціонально значення останнього не враховувалися, то ця залежність описується рівнянням: $\tau = 212 \cdot \dot{\gamma}^{0.4}$, при цьому $\tau = 0.993$. В результаті проведених досліджень [20] визначено рівняння, яке найбільш точно з

існуючих описує поведінку тіста (замішаного) в діапазоні швидкостей деформації зсуву $0,4 \dots 1300 \text{ с}^{-1}$ та в'язкостей $3 \dots 310 \text{ Па}\cdot\text{с}$, а саме рівняння Гершеля-Балклі.

Аналіз отриманих результатів дає практичну можливість визначати параметри робочих органів, у яких співвідношення діаметра робочого органу і швидкості його руху знаходиться в певному діапазоні, що забезпечує найбільшу ефективність роботи. Залежності дозволяють коректно поставити задачу математичного моделювання процесу дії валків на стадії течії і отримати в підсумку адекватні результати.

2.2.2. Механічні властивості вибродженого тіста при деформації

В результаті тривалого бродіння за допомогою дріжджів та інших мікроорганізмів утворюється капілярно-пориста структура тіста. Структура утримується пружним еластично-пластичним скелетом, пори якого заповнені газовою сумішшю. Вони складаються з діоксиду вуглецю, парів води, спирту та інших продуктів бродіння. Під дією газу, що утворюється в процесі бродіння, тісто збільшується в об'ємі, зменшується його густина та змінюються структурно-механічні властивості.

Механічні властивості вибродженого тіста характеризуються здатністю збереження і зміни форми (деформації) під дією зовнішніх зусиль, включаючи і гравітаційні сили. Зміна форми тіста або деформації після зняття зовнішніх зусиль валків можуть бути зворотними (пружними) або залишковими (пластичними). Зворотні деформації в залежності від швидкості поведінки тіста ділять на умовно-миттєво пружні, що розвиваються в часі – тимчасові, або високо еластичні. У перших тривалість поведінки визначається долями секунди, у других вони можуть обчислюватися цілими секундами в межах $1 \dots 3$ і більш десяткових порядків [8, 17, 18].

На основі праць [2, 17] у першому випадку це відбувається внаслідок зміни форми молекул і тимчасового порушення їх вторинних (внутрішньо молекулярних) хімічних зв'язків з поступовим розвитком еластичних деформацій, що «запізнюються», також поступово зникаючи після зняття зовнішніх зусиль (деформацій «післядії»). В другому – в результаті руйнування частини міжмолекулярних зв'язків. У молекулах є залишкові (пластичні) деформації течії.

Еластичні деформації тіста можуть мати значні розміри, що у багато разів перевищують величини миттєво-пружних деформацій. Пластичні деформації властиві тістоподібним масам, розчинам. Вони розвиваються одночасно, є

еластичними, тому і можуть бути великими. Текучість тіста або напівфабрикату пропорційна коефіцієнту внутрішнього тертя їх частинок, або в'язкості. Реальні фізичні тверді тіла разом з пружністю володіють пластичністю. Особливо колоїдним розчинам в певних умовах властиві пружність-еластичність [13, 15].

Границя текучості характеризує міцність структури системи. В тісті границя текучості відповідає напруженню, при якому різко падає значення ефективної в'язкості [16]. Для виведення розрахункових рівнянь в реології використовується метод аналогії, тобто застосовуються рівняння механічних моделей деяких фізичних тіл. Найбільш близька до механічних властивостей тіста модель (рис. 1.1), де присутні елементи Максвелла і Кельвіна, що з'єднані паралельно, описують пружньо-в'язкі властивості, а елемент Сен-Венана – пластичні властивості.

В процесі течії тіста між валками воно одержує різні механічні впливи із сторони робочих органів машини. При формозміні в тісті порушуються структурні зв'язки, степінь їх порушень визначається величиною зусиль зовнішньої дії. Внутрішній опір тіста залежить в значній мірі від багатьох факторів: сорту борошна, рецептури, сцифіки технологічного процесу. Знання цих факторів та їх залежностей від технологічних параметрів, відношення рецептурних компонентів дозволить вирішити проблему контролю якості формування виробів.

Тісто володіє певним опором по відношенню до відшарування від поверхні робочої камери. Такий шар моделюється як тіло Бінгама, реологічна форма якого має вигляд $V=H-(N|Stv)$. Наявність в даній моделі тіла Сен-Венана (Stv) дозволяє відобразити здатність даного шару тіста опиратися рухові (сколювання) або міцність (адгезії) з основною частиною тіста. В термінах напружень і деформації для тіла Бінгама маємо:

$$\sigma=2\mu\epsilon, \text{ якщо } |\sigma| < |\nu|$$

$$\sigma=2\eta\dot{\epsilon}+\nu, \text{ якщо } |\sigma| \geq |\nu|, \text{ де } \nu - \text{ характеристика зчеплення (адгезії).}$$

Тісто є найбільш яскравим представником матеріалів, що релаксують. Причиною релаксації матеріалу є внутрішня течія. При незмінній досягнутій деформації внутрішня течія послаблює напруження таким чином, що з часом вимагається все менше зусилля для підтримання маси тіста в деформованому стані. Для характеристики процесу релаксації є час, протягом якого напруження спадає на повну (значну) величину. Для тіста час релаксації, в основному, залежить від в'язкості. Із збільшенням температури разом із зменшенням в'язкості зменшується і час релаксації [14].

Вияв тістом пружних або в'язких властивостей залежить тільки від співвідношення між часом дії навантаження і часом релаксації напружень.

Встановлено [14, 16], що час дії навантаження значно менший часу релаксації, то тісто поводить себе як ідеально пружне. І навпаки, якщо час навантаження значно більший за час релаксації, то воно проявляє властивості в'язкої рідини. Якщо ці величини одного порядку, то тісто поводить себе як пружньо-в'язкий: одночасно спостерігаються пружність і течія. На основі отриманих значень в'язкості і модулів пружності (рис. 2.5) та еластичності можна визначити:

- а) максвеллову константу часу релаксації: $t_1 = \eta_0/E$;
- б) час пружної післядії: $t_2 = \eta_2/E$.

2.3. Реологічна модель нагнітання тіста валками з прямими пазами

На основі ґрунтового аналізу досліджень впливу на тісто нових валків було підтверджено, що зтягування маси в об'ємі робочої камери кінетична крива має три характерні ділянки (див. 2.1). Кожна ділянка відображає певний у часі період процесу, що характеризує ступінь рівноважного руйнування структури тіста від механічних впливів в усьому можливому діапазоні зміни ефективної в'язкості $\eta_{\text{ef}}=f(\tau)$. Одночасно існують ділянки, де залежність $\dot{\gamma}(\tau)$ лінійна, а значить пластична в'язкість постійна. З цього випливає, що всі режими течії не суперечать наявності лінійних ділянок на реологічній кривій. Жодна формула при скінчених значеннях $\dot{\gamma}$ не може в одному інтервалі давати лінійну, а в іншому – нелінійну залежність [2, 8].

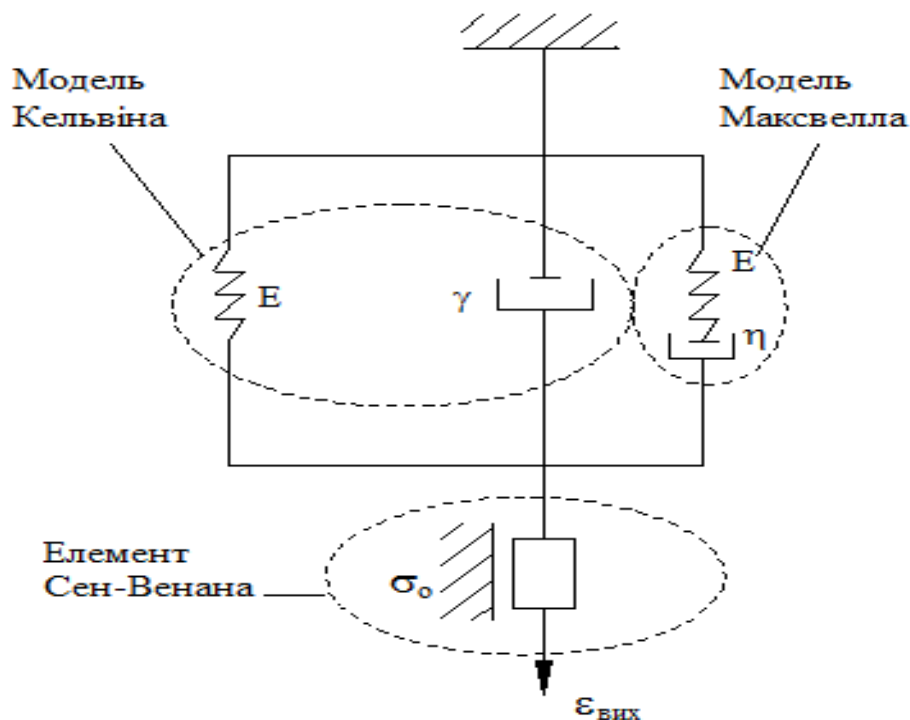


Рис. 2.5. Модель пружньо-в'язкого та пластичного тіста

На основі цього, для практичних потреб немає необхідності будувати повну криву течії, адже, як правило, заздалегідь відомі межі напружень і швидкостей деформацій, характерні для даного валкового процесу. Одержання форми, забезпечення формоутримуючих властивостей тіста і визначення раціональних режимів обробки є тісним взаємозв'язком між встановленою кількістю факторів, що впливають на надійність валків та якість процесу і виробу. Тому врахування структурно-механічних і специфічних властивостей тіста та наявність зворотних зв'язків між його властивостями й конструктивними показниками гвинтових валків, без якісного контролю за протіканням процесу, дозволяє встановити їхні закономірності і обчислити раціональні параметри окремих операцій.

Так, як загальна деформація механічної моделі нагнітання тіста валками описана в розділі 3, то для опису текучості тіста між новими валками є рівняння течії бінгамівської рідини [31]:

$$\theta = \theta_0 + \eta_{пл} \dot{\gamma}$$

де θ – напруження зсуву;

θ_0 – межа плинності (початкове напруження зсуву);

$\eta_{пл}$ – пластична в'язкість;

$\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву.

Загальна модель деформації буде дорівнювати сумі деформацій, що відбуваються в робочій камері нагнітального вузла машини. На основі цього, нами запропонована механічна модель, в склад якої входять зміни реології тіста за період процесу (рис. 2.6). Напруження зсуву в тісті постійно змінюється, а час прикладання сил деформацій (затягування, стискання, витікання) настільки малий, що миттєво досягається граничне напруження зсуву. Тому загальна деформація моделі процесу дорівнює сумі деформацій:

$$d\gamma = d\gamma_z + d\gamma_c + d\gamma_m$$

де $d\gamma_z, d\gamma_c, d\gamma_m$ – деформації, відповідно тіл Максвелла, Бінгама, Шведова.

Беручи похідну від лівої і правої частин рівняння, отимаємо:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\gamma_z}{dt} + \frac{d\gamma_c + d\gamma_m}{dt}$$

Величину $\frac{d\gamma_z}{dt}$ визначимо з рівняння пружно-в'язкого релаксуючого тіла Максвелла, що являє собою послідовно з'єднані моделі Гука і Ньютонів:

$$\frac{d\gamma_z}{dt} = \dot{\gamma} = \frac{\dot{\theta}}{G} + \frac{\theta}{\eta}$$

По мірі збільшення часу t деформація збільшується і асимптотично наближується до величини $\dot{\gamma} = \frac{\theta - \theta_T}{\eta_{nl}}$.

Отже, деформація тіла Бінгама не розвивається миттєво, а затримується за рахунок допустимих умов текучості (зворотній рух).

Відповідно, величина деформації при початковій течії тіста через зазор між валками, можна виразити рівнянням Шведова:

$$\dot{\gamma} = \frac{\theta - \theta_T}{\eta_{nl}} + \frac{\dot{\theta}}{G}$$

Загальне рівняння реологічної моделі нагнітання тіста валками буде:

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\theta}}{G} + \frac{\theta}{\eta} - \frac{\theta - \theta_T}{\eta_{nl}} + \frac{\theta - \theta_T}{\eta_{nl}} + \frac{\dot{\theta}}{G}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\theta}}{G} + \frac{\theta}{\eta} + \frac{\dot{\theta}}{G}$$

При нагнітанні тіста валки миттєво діють на нього. Будемо вважати, що в момент $t=0$ надано валками напруження θ_0 і в'язка деформація рівна нулю. Тому деформація тіста буде рівна тільки пружній деформації:

$$\gamma_0 = \frac{\theta_0}{G}$$

Дана деформація не змінюється в часі, тобто $\gamma = \gamma_0$ то $\dot{\gamma} = 0$. Тому наше рівняння матиме вигляд:

$$\frac{\dot{\theta}}{G} + \frac{\theta}{\eta} + \frac{\dot{\theta}}{G} = 0$$

Інтегрувавши його, одержимо:

$$\frac{\dot{\theta}}{G} + \frac{\theta}{\eta} + \frac{\dot{\theta}}{G} = 0,$$

$$2 \frac{\dot{\theta}}{G} + \frac{\theta}{\eta} = 0,$$

$$\frac{2}{G} \frac{d\theta}{dt} = -\frac{\theta}{\eta}; \left| -\frac{dt}{\theta} \right.$$

$$\frac{2}{G} \frac{d\theta}{\theta} = -\frac{1}{\eta} dt.$$

$$\frac{2}{G} \int \frac{d\theta}{\theta} = -\frac{1}{\eta} \int dt.$$

$$\frac{2}{G} \ln|\theta| = -\frac{1}{\eta} t + c, \dots \theta(0) = \theta_0$$

$$c = \frac{2}{G} \ln|\theta_0|.$$

Отже,

$$\frac{2}{G} \ln|\theta| = -\frac{1}{\eta} t + \frac{2}{G} \ln|\theta_0|,$$

$$\frac{2}{G} (\ln|\theta| - \ln|\theta_0|) = -\frac{1}{\eta} t,$$

$$\frac{2}{G} \left(\ln \left| \frac{\theta}{\theta_0} \right| = -\frac{1}{\eta} t, \dots \right) * \frac{G}{2}$$

$$\ln \left| \frac{\theta}{\theta_0} \right| = -\frac{G}{2\eta} t,$$

$$\frac{\theta}{\theta_0} = e^{-\frac{G}{2\eta} t}.$$

$$\theta = \theta_0 e^{-\frac{G}{2\eta} t}$$

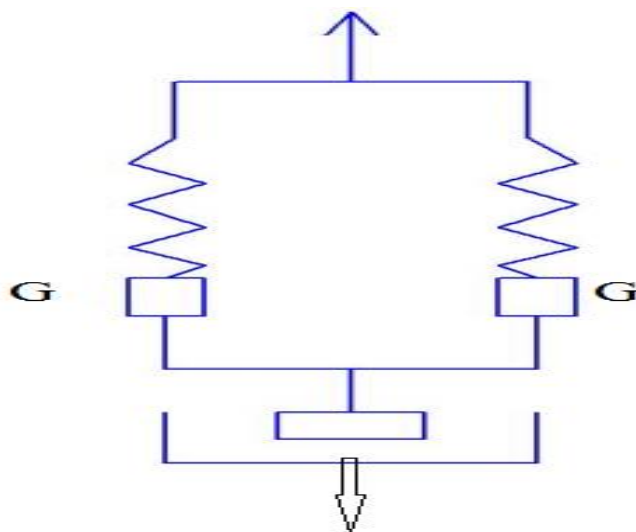


Рис. 2.6. Реологічна модель тіста при нагнітанні валками

Модуль зсуву G зв'язаний з модулем розтягу E залежністю $G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$,

де μ – коефіцієнт Пуасона, рівний у нестисливих рідинах 0.5;

E – модуль пружності розтягу.

Величина $\frac{\eta}{G} = T_z$, є періодом релаксації. При $t = 0$, $\theta = \theta_0$, а при $t = T_{\text{рел}} = \frac{\eta}{G}$, $\theta = \frac{\theta_0}{e}$, тобто період релаксації в тісті, де напруження падає в e разів.

Механічна реологічна модель нагнітання тіста валками і її математичний опис потрібні не лише для об'єктивної оцінки консистенції тіста за короткий процес, а і для можливості оцінити його поведінку на всіх стадіях.

2.4. Реологічна модель нагнітання тіста валками з гвинтовими пазами

Результати досліджень впливу конструктивних параметрів робочого органу машин на швидкість формування та зміни структури середовища підтвердили важливість і необхідність врахування цих факторів при обґрунтуванні оптимальних параметрів замішування, нагнітання і встановлення продуктивності машин [8]. Вивчення структурно-механічних властивостей

пружно-пластично-в'язкого середовища показало, що продуктивність машин визначається в основному конструктивними параметрами робочих органів – геометрією, кінематикою та площею контакту. Крім того, в умовах безперервного процесу характеризує також кут затягування і нагнітання, що забезпечує транспортування тіста в потоці робочої камери. Важливу роль відіграє рівномірне заповнення робочої камери середовищем, щільність якого змінюється в процесі. Рівномірне заповнення робочої камери також може бути забезпечене і за рахунок зміни її обсягу. Конструктивно це можна вирішити створенням машини з двома робочими камерами чи камери змінного перетину.

Слід зауважити, що на зміну структури середовища впливають й інші фактори, такі як: якісні показники компонентів, умови їх зберігання; температурні параметри взаємодії компонентів; мікроклімат середовища у якому відбувається сам процес. Проведені дослідження показали, що краща якість напівфабрикату із тіста і готових виробів досягається при рівномірному заповненні камери протягом всього процесу нагнітання. Основними впливовими факторами на якісні показники готового продукту є структурно-механічні характеристики утвореної маси середовища вже у робочій камері машини.

Так як присуті у вузлі нагнітання деформації розтягу, стискання, кручення, то поряд із зовнішніми змінами форми відбуваються зміни внутрішнього розташування часток структури тіста. Постійна зміна розташування часток у структурі тіста відбувається шляхом простих деформацій зсуву. Одночасно виникають не тільки дотичні, а й нормальні напруження, які можуть досягати значень, що перевищуватимуть відповідні значення дотичних напружень. Це явище, вперше розглянув і проаналізував Вайссенбергом для дисперсних систем. Вже довгий час воно є предметом досліджень різних вчених, погляди яких значно відрізняються [2, 12, 14, 26].

Механічна дія валкових робочих органів та температура в робочій камері впливає на тривалість окремих стадій деформації. Вони можуть змінюватись та переміщуватись, а також збігатись. При багаторазових деформаціях тіста валками тиск в зоні нагнітання збільшується, що необхідно враховувати при проектуванні вузла нагнітання. Тиск у тістовій масі при стисканні розподіляється нерівномірно і залежить від тривалості прикладеної сили деформації. Тому реологічні властивості тіста при нагнітанні дадуть нам можливість якісно і кількісно визначити його поведінку під впливом конструктивних і технологічних факторів та дозволяють зв'язати між собою напруження деформації у процесі дії валкових зусиль.

Відомо, що у тісті є просторова структура, що створює опір напруженню нижче допустимого напруження зсуву. При більшому напруженні, структура тіста руйнується. Так як тісто є дисперсним середовищем з розподіленими фазами, то зважені частинки представляють собою складну різного характеру форму, розміщену в ньому. При дії валків тісто піддається розтягуванню і сприймає ту форму течії, яка його спонукає до обертання по осі течії. Такий стан тіста веде до зміни в'язкості. Зміна в'язкості відбувається за рахунок пружної деформації частинок. При простому зсуві максимальне напруження розтягу і стискання знаходиться під кутом до напрямку зсуву. Тому при збільшенні зсуву, в'язкість збільшується.

Розвиток пружно-пластичних деформацій зсуву в масі тіста, яке піддається деформації і бродить в робочій камері, знижує свою густину. Процес проходить при відповідних понижених напруженнях, тому початкові модулі пружно-еластичності зсуву і в'язкості такого тіста повинні бути не вище як у тіста, яке не бродить [2]. Зменшення густини тіста при бродінні дозволяє білкам більше реалізувати еластичні властивості, тобто знизити модуль пружно-еластичності зсуву.

Коли час контакту тіста і валка дуже малий, в зоні навантаження відбувається адіабатичний стиск повітря, що виникає із за двох причин:

- повітря не встигає вийти з пористої структури;
- через малу теплопровідність тіста не відбувається теплообмін повітря в порах з навколишнім середовищем.

На основі обґрунтованого аналізу результатів досліджень [30, 31] встановлено, що керування деформаційними процесами необхідне при умовах:

- обмежити кількість теплоти, акумульованої тістом, з метою зменшення термічних напружень;
- забезпечити роботу взаємодії валка і тіста з прийнятною енергонавантаженістю для підвищення фрекційних властивостей їхніх поверхневих шарів;
- встановити взаємозв'язок між темпом взаємодії деформаційних процесів з кутом захвачування і нагнітання тіста.

Аналіз дії валків на тісто дав змогу визначити найбільшу розтяжність його в межах кута φ , який має початок своїх значень при 45^0 до направляючої зсуву.

Враховуючи вище викладене, що ґрунтується на аналізі взаємодії валків з дріжджовим тісто, нами спроектовано і розроблено нову конструкцію вузла нагнітання (рис. 2.7). На перший погляд вузол має всі конструктивні параметри,

які не відрізняються від існуючих. Основною відмінністю є конструктивні параметри і геометрія поверхні валка, спосіб затягування і нагнітання тіста, додержання постійного розташування часток в структурі тіста за рахунок простих деформацій зсуву. Такий підхід дозволив сприймати ту форму течії тіста, яка спонукає рухатись по осі без додаткових тепловиділень, тобто, зменшенні в'язкого тертя.

Розглянемо основні параметри процесу і їх вплив на нього. Тісто після замісу піддається багаторазовій деформації, тобто перетворенню його маси в пласт, шляхом пропуску через обертові валки формувальної машини. Маса тіста в однаковій мірі одержує деформацію стискання, розтягування. Тиск повітря буде не рівномірний в тісті і не рівномірно розподілятися в його масі. На виході тіста із обертових валків величина стиску є маєже однорідною, так як відбувається максимальний контакт їх поверхонь.

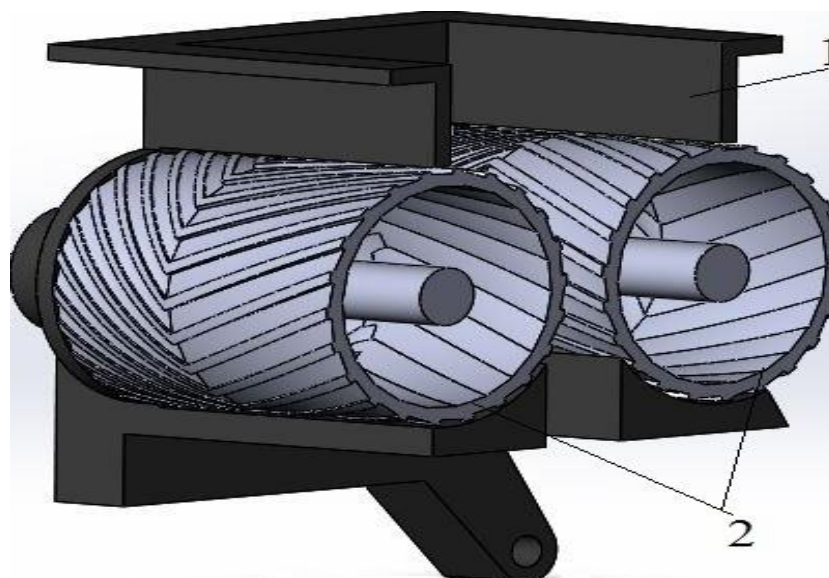


Рис. 2.7. Поперечний переріз вузла нагнітання тіста:
1 – робоча камера; 2 – гвинтові валки.

При нагнітанні тіста із однаковою черговістю направленої деформації, в ньому виникають здебільшого поздовжні напруження, що призводить до розтягування пласта тіста. Напруження, що виникли при цьому, розподіляються рівномірно по масі тіста і деформація буде відбуватися в рівній мірі по довжині і ширині утвореної його форми в зазорі між валками.

При дії зовнішньої сили на тісто у ньому виникає відповідна реакція двох сил діючих паралельно одна одній:

$$F=F_1+F_2.$$

де F_1 – сила опору тіста при деформації;

F_2 – пружна сила, що виникає при адіабатному стиску повітря.

Завдяки перманентному утворенню вуглекислоти і збільшенню таким шляхом об'єму, тісто яке продовжує бродити в робочій камері вузла нагнітання, має відмінність від тіста яке не бродить, тому що є двояко напруженою системою. Сили гравітації його маси при бродінні уступають утворюючій силі, що розвивається і рухає газові бульбашки по закону Стокса (рух сферичних тіл у в'язкому середовищі). В результаті математичного опрацювання експериментальних даних отримали криву течії бубличного дріжджового тіста (рис. 2.8).

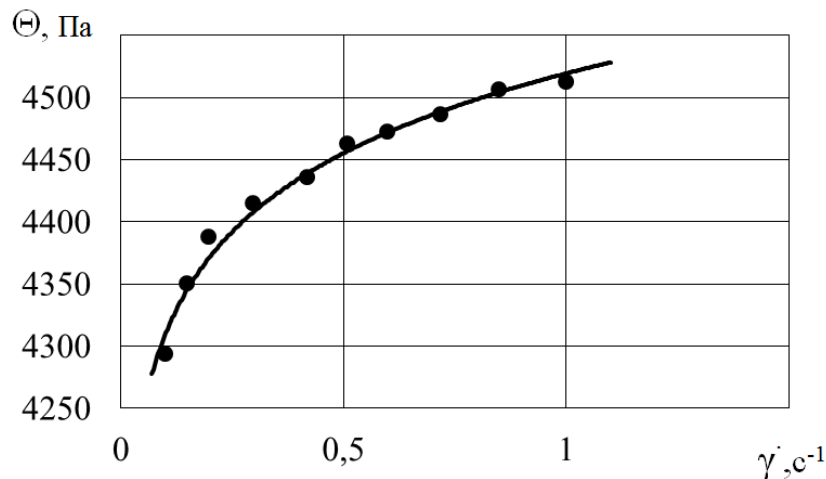


Рис. 2.8. Залежність напруження зсуву від швидкості зсуву

Отримана залежність характеризує поведінку тіста і носить степеневий характер рівняння:

$$\theta = 4520 \cdot \gamma'^{0.02}$$

Сьогодні не існує методів, здатних повністю виключити бродіння з технологічної схеми виробництва бубликів. Посилена механічна обробка тіста валками і формувальними пристроями не забезпечують потрібної якості готових виробів. Тому збереження всіх необхідних реакцій, що відбуваються при бродінні, за умови зміни валкового нагнітання є актуально вирішеною проблемою у новій конструкції вузла. Зменшуються при цьому втрати сухих речовин.

Зв'язок між тиском і об'ємом має нелінійний характер. Найбільша зміна об'єму проходить на початковій стадії деформації і з плином процесу зменшується при переході до максимального тиску. В результаті математичної обробки даних стискання бубличного дріжджового тіста отримало емпіричне рівняння:

$$pV^x = b \cdot 10^c$$

де p – тиск, МПа;

V – об'єм тіста в робочій камері, см³;

x, b, c – імперичні коефіцієнти при газовій фазі 6,65%, вони становлять: 36,4, 0,78, 49,8; при 12%–18,1, 0,18, 26,7.

З аналізу рівняння випливає, що показник степені тіста тим більший, чим менше газової фази. Отже, стискання тіста відбувається за рахунок газової фази і деформації структурної сітки тіста. Тому на початковій стадії затягування тіста валками при стисканні відбувається розсіювання газових бульбашок і їх стискання. З подальшим впливом валків проходить дифундування бульбашок в масу тіста. При зниженні деформації розчинений газ починає виділятися із усієї маси тіста, що спряє її збільшенню. Також необхідно відзначити, що при не змінному тиску кількість виділеного газу менша ніж в періоді стискання. Постійний приріст бульбашок газу після зняття деформації, яка триває 1.6 с, відбувається із-за бродіння тіста.

Температура є одним із важливих факторів, що впливає на реологічні властивості тіста. Характер зміни температури впливає на зміну в'язкості, що дозволяє в деякій мірі контролювати технологічний процес по виявленню оптимальних режимів роботи вузла нагнітання. Реологічні властивості бубличного тіста в дослідженні ряду авторів [13, 30, 31] свідчать про зв'язок в'язкості, допустимого напруження зсуву, модуля пружності зсуву і модуля пластичності. Із збільшенням температури їх властивості зменшуються. Залежність в'язкості від температури для вузла нагнітання виражається відношенням різниці в'язкості при двох різних температурах до різниці цих температур:

$$\frac{\eta_{t_1} - \eta_{t_2}}{t_2 - t_1}$$

Із залежності випливає, що при невеликій зміні температури режим нагнітання тіста валками веде до значних коливань величини в'язкості і інших фізико-механічних характеристик. Одночасне збільшення швидкості зсуву при всіх температурах призводить до зменшення в'язкості. Відповідно це призводить до зменшення абсолютної величини різниці між вязкостями при двох різних температурах. Аналітичну залежність між в'язкістю і температурою встановив Ле-Шательє. Для визначення в'язкості можна використати рівняння:

$$\eta_T = e^{\frac{A}{t^B}}$$

де t – температура, С;

A і B – константи, одержані дослідним шляхом і які залежать від швидкості зсуву.

Ефективна в'язкість, яку отримують по повній реологічній кривій, вважається основною характеристикою структурно-механічних властивостей дисперсних систем. Залежність ефективної в'язкості від градієнта швидкості зсуву $\eta_{ef} = f(\dot{\gamma})$ зображено на рис. 2.9.

Ефективна в'язкість зменшується із збільшенням швидкості зсуву. Це обумовлено орієнтацією високомолекулярних сполук тіста в напрямку руху зростаючих зусиль зсуву.

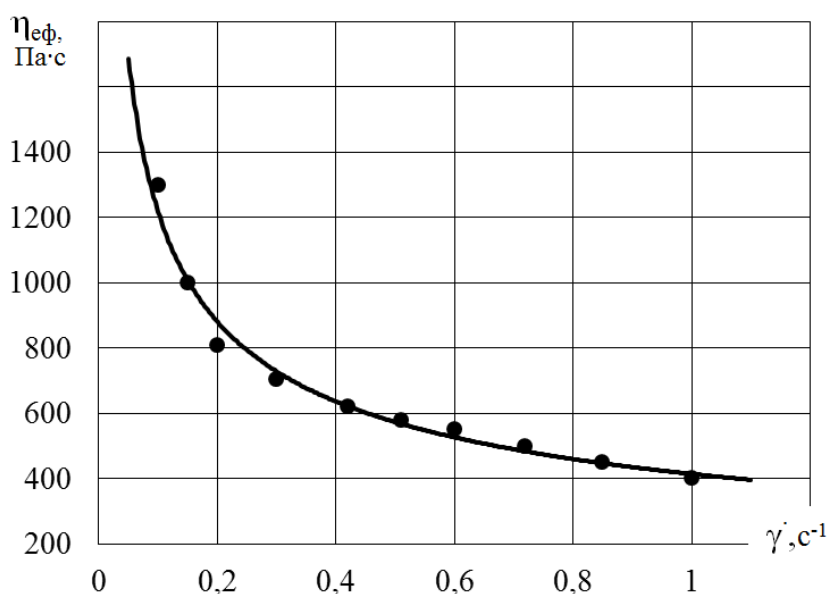


Рис. 2.9. Залежність ефективної в'язкості від швидкості зсуву

Математичний вираз функції:

$$\eta_{\text{ef}} = 415 \cdot \gamma^{-0,47}$$

Збільшення швидкості зсуву призводить до зменшення в'язкості, що характерно для тіста, в якого при деформуванні відбувається орієнтація молекул у напрямку зсуву і порушення зв'язків між ними.

Методи фізико-хімічної механіки дозволяють встановити взаємозв'язок властивостей тіста з технологічним контролем процесу нагнітання. Аналіз дослідження показав можливість встановити взаємозв'язок усіх деформацій, що відбуваються при нагнітанні (в робочій камері вузла нагнітання), на визначення реологічної моделі процесу.

Дослідження ефективної в'язкості тіста η_{ef} в залежності від дії напруження зсуву Θ , градієнта швидкості γ , а також швидкості течії (продуктивності Q) дозволяє визначити нам реологічну поведінку тіста в умовах дії розроблених валків вузла нагнітання. Відповідно визначити характер руйнування структури тіста і оптимальні режими його деформації (затягування, стискання, нагнітання, розкачування).

Дослідження показали, що не залежно від сорту борошна, з якого приготовлено тісто для бубликів, його вологості W і тривалості бродіння $t_{\text{бр}}$ ефективна в'язкість тіста η_{ef} із збільшенням напруження зсуву Θ зменшується. Тому деформаційна поведінка тіста у вузлі нагнітання розробленої конструкції може бути описана сумою трьох складових: пружною деформацією, залишковою деформацією та високо еластичною деформацією. Перша деформація є зворотною до напрямку напружень, друга безповоротною, а третя – зворотня, де її релаксація проходить із затримкою у часі. Найбільш характерні особливості механічної поведінки тіста виявляються при дії валків з постійною дискретною швидкістю деформації. У цьому режимі відбувається стійкість тіста в порівнянні з існуючими валками. Цьому сприяє вплив граничних умов та наявності сил тертя на поверхнях валків. В області пружних деформацій тіста у новому вузлі нагнітання обумовлено стійкість однорідності поля напружень і деформацій. Ця стійкість відбувається за рахунок конструкції поверхні валків та контакту з масою тіста, тривалістю циклів.

На основі розглянутих та проведених досліджень, нами розроблено уточнену реологічну модель (див. рис. 2.10). Деформація тіла Бінгама розвивається миттєво, тому наше рівняння має вигляд:

$$\frac{3}{G} * \dot{\theta} + \left(\frac{1}{\eta} + \frac{2}{\eta_{\text{пл}}} \right) * \theta = \frac{2\theta_T}{\eta_{\text{пл}}}$$

$$\theta = uv, \dot{\theta} = \dot{u} * v + u \dot{v}$$

Швидкість поширеної пружної деформації в тісті є одночасною функцією напружень і температури, які є близькими до експотенційних. Інтегрування рівняння нам дає:

$$\frac{3}{G} (\dot{u} * v + u * \dot{v}) + \left(\frac{1}{\eta} + \frac{2}{\eta_{\text{пл}}} \right) * uv = \frac{2\theta_T}{\eta_{\text{пл}}}$$

$$\frac{3}{G} \dot{u} * v + u \left(\dot{v} + \left(\frac{1}{\eta} + \frac{2}{\eta_{\text{пл}}} \right) * v \right) = \frac{2\theta_T}{\eta_{\text{пл}}}$$

$$\frac{dv}{dt} = - \left(\frac{1}{\eta} + \frac{2}{\eta_{\text{пл}}} \right) * v$$

$$\int \frac{dv}{v} = - \int \left(\frac{1}{\eta} + \frac{2}{\eta_{\text{пл}}} \right) dt$$

$$\ln|v| = \left(\frac{1}{\eta} + \frac{2}{\eta_{\text{пл}}} \right) * t$$

$$v = e^{-\left(\frac{1}{\eta} + \frac{2}{\eta_{\text{пл}}}\right) * t}$$

$$\frac{3}{G} * \frac{du}{dt} * e^{-\left(\frac{1}{\eta} + \frac{2}{\eta_{\text{пл}}}\right) * t} = \frac{2u_T}{\eta_{\text{пл}}}$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{2\theta_T}{\eta_{\text{пл}}} * \frac{G}{3} * e^{-\left(\frac{1}{\eta} + \frac{2}{\eta_{\text{пл}}}\right) * t}$$

$$u = \frac{2\theta_T G}{3\eta_{\text{пл}}} \int e^{-\left(\frac{1}{\eta} + \frac{2}{\eta_{\text{пл}}}\right) * t_{0/T}}$$

$$u = \frac{2\theta_T G}{3\eta_{\text{пл}}} * \frac{\eta\eta_{\text{пл}}}{\eta_{\text{пл}}2\eta} e^{-\left(\frac{1}{\eta} + \frac{2}{\eta_{\text{пл}}}\right) * t} + C$$

$$u = \frac{2}{3} \frac{\theta_T G}{\eta_{пл} + 2\eta} * \eta * e^{-\left(\frac{1}{\eta} + \frac{2}{\eta_{пл}}\right) * t} + C$$

$$\theta_{(t)} = \frac{2}{3} \frac{\theta_T G \eta}{\eta_{пл} + 2\eta} + C * e^{-\left(\frac{1}{\eta} + \frac{2}{\eta_{пл}}\right) * t}$$

Дане рівняння показує взаємозв'язок початкової деформації тіста θ_0 у початковий момент часу ($t=0$) із напруженням θ при постійній деформації і η вязкості тіста, що частково змінюється. Із рівняння видно, що із збільшенням модуля пружності G , деформація збільшується і асиметрично наближається до величини в'язкості. Отже, деформація тіста не розвивається відразу, а затримується за рахунок його пружних сил. Величина G характеризує швидкість деформації і може бути як рушійним коефіцієнтом процесу. У рівнянні додаток виразу суттєво не впливає на процес, так як його значення є досить малими. При зміні граничних напружень зсуву, що характеризують міцність просторової структури тіста, спостерігається повільна течія. При такій дуже повільній течії структура частково руйнується, але встигає знову відновитися. Рівноважна ступінь руйнування структури в такому повільному стаціонарному потоці є досить малою. Такий характер зміни пластичної $\eta_{пл}$ вязкості тіста в залежності від швидкості зсуву вказує на наявність в них внутрішніх зв'язків, що обумовлюють структуроутворення. На підставі реологічної моделі запропоновано механічну модель (рис. 2.10)

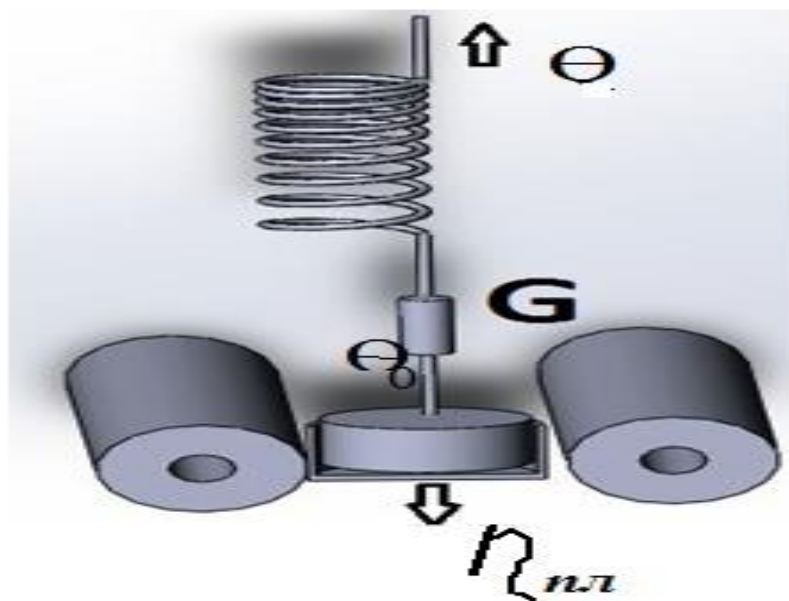


Рис. 2.10. Механічна реологічна модель тіста при нагнітанні

Модель відрізняється від тіла Бінгама тим, що паралельно тілу Сен-Венана присутнє тіло Максвелла. Такий взаємозв'язок показує рівномірність пружних і в'язких елементів при деформації тіста. Не лінійність течії, обумовлена зміною в'язкості і залежить від швидкості зсуву, пружної деформації. Такі часті зміни деформації постійно передаються тістові, що викликає збільшення енергії дисипації. Тому при збільшенні швидкості зсуву, в'язкість також збільшується.

Тісто під дією поверхні валків знаходиться в ненатягнутій формі, вільній і навіть з деяким розслабленим станом. Воно прагне відновити свою первісну форму. Вплив конструкції валка сприяє зниженню в'язкості і збільшення пластичності тіста. При дії поверхні валка відбувається рівномірний розподіл повітря, а надлишок повітря віддаляється, завдяки чому тісто набуває дрібнопористу структуру. Найбільш пластичне тісто при нагнітанні є при температурі, близькою до температури замісу. Характерний глянець, що з'являється на поверхні виробів, в значній мірі є наслідком дії валків.

Запропонована реологічна модель, що враховує граничне напруження зсуву і в'язкість тіста, залежить від швидкості деформації. Модель є простою і має мінімальну кількість параметрів. Для інженерних розрахунків вона може задовільно описати поведінку дріжджового тіста при дії валків.

2.5. Адгезія, основні поняття та визначення

В процесі дії робочих органів на середовище відбувається фрекційна взаємодія їх поверхонь. Характер течії маси середовища у вигляді різного профілю каналів формувальних машин (шнекові, валкові, лопатеві), а також по трубопроводах визначається структурно-механічними властивостями та силою взаємодії (прилипання) із поверхнями контакту. Тому для харчових мас характерні різні відривання від поверхонь: адгезійні, когезійні, змішані.

Отже, величину адгезії двох тіл прийнято характеризувати силою відриву, питомою роботою відриву відносно одиниці площі, часом контакту для зміни умов зв'язку між субстратом і адгезивом при дії навантаження. Із сказаного випливає, що на формування адгезійних зв'язків великий вплив мають реологічні властивості адгезиву, чистота поверхні, тривалість та тиск при контакті, температура і швидкість відривання від поверхні. Тому при проектуванні машин необхідно постійно враховувати явища адгезії для вибору матеріалу деталей, робочих органів, робочих камер.

Для валкових робочих оганів у вузлі нагнітання фомувальної машини характерно максимальне збільшення сил взаємодії тіста із площею контакту валка. Порушення цих взаємних співвідношень приводить до випуску неякісної продукції та зменшення ефективності машини. Ці явища на сьогодні досить мало вивчені, а природа адгезії вимагає дослідження. Часто природу адгезії пояснюють дифузійною і електричною теорією [20]. Адгезія завжди є результат міжмолекулярної взаємодії поверхонь, різних по своїй природі [21].

Згідно цієї теорії, при контакті двох тіл за рахунок макроброунівського руху, виникає перегруповування молекул. Це відбувається таким чином, що великі частинки молекул приближаються до поверхні контакту, встановлюють водневий зв'язок із такими ж молекулами або з полімерними групами контактуючого тіла. Це викликає адсорбційний зв'язок у рівновазі. Вплив тиску і температури при їх збільшенні сприяє досить швидкому встановленню рівноваги.

У харчовій помисловості існує багато процесів в яких одночасно взаємодіють сили тертя і адгезії. Ці явища виникають при відносному зміщенні контактуючих поверхонь двох тіл. В дослідженнях Б. В. Дерягіна встановлено зв'язок тета і адгезії виразом:

$$P = \mu N + \mu p_0 S_0$$

де μ – дійсний коефіцієнт тертя;

S_0 – площа контакту, м²;

N – нормальне навантаження, Н;

p_0 – питома прилипання на ділянці S_0 , Па;

P – сила зовнішнього тертя, Н

На основі цієї теорії [20] тертя між гладкими поверхнями виникає молекулярною широховатістю, тобто, силами борновського відштовхування електронних оболонок атомів контактуючих тіл. Сили прилипання у рівнянні визначають відхилення теорії Б.В. Дерягіна від закону Амонтона.

Закон виражає пропорційність сил тертя до нормального навантаження.

Деякі дослідники вважають, що єдиною причиною зовнішнього тертя є сили притягання між поверхнями тіл. Згідно теорії тертя Терцаги-Боудена сили тертя рівні:

$$P \parallel \tau S_0$$

де τ – опір зсуву, Па;

S_0 – площа зсуву, м².

Так, І. В. Крагельський [22] відзначив, що в процесі тертя двох тіл в різних точках контакту можуть одночасно перебувати п'ять видів фракційного зв'язку. До цих зв'язків він відносить: зріз, пластичне відтискання, пружну деформацію, адгезійне та когезійне руйнування. Спираючись на дану теорію більшість винахідників стверджують, що існує дві складові-адгезійна й деформаційна [23]. Д. Мур запропонував силу тертя визначати рівнянням:

$$P=P_a+P_d+P_k+P_v$$

де P_a і P_d – адгезійна та деформаційна складова сил тертя, Н;

P_k – когезійна складова, що враховує зношування на об'ємні втрати, Н;

P_v – складова в'язкого гальмування при наявності змащування, Н.

2.5.1. Підходи до визначення адгезії

Адгезію відносять до поверхневих явищ, які виникають при контакті різнорідних тіл.

Існують різні підходи до визначення адгезії. Вони можуть бути розділені на три групи [20]:

- визначення адгезії, як процесу (поступову зміну стану);
- визначення адгезії, як властивостей, які характеризують особливість даної системи;
- визначення адгезії, як стану (зовнішні і внутрішні обставини, які характеризують стан системи);

Визначення адгезії, як процесу було дано Ребіндером П. А. [25]: Адгезія (прилипання) – виникнення зв'язку між поверхневими шарами двох різнорідних (твердих або рідких) тіл (фаз) які дотикаються одна до іншої. Аналогічне визначення було дано у деяких інших джерелах [7, 8, 9]. Тобто адгезія трактується як процес при зближенні та віддаленні тіл одне від іншого.

Визначення адгезії, як властивості, є в роботах А. А. Берлин, В. Е. Басик [26, 27] та Зимона [28], які дають таке визначення: «Під адгезією розуміють молекулярний зв'язок між поверхнями приведених в контакт різнорідних тіл». Аналогічні визначення дані С. Wake [29], Л.-Х. Ли [25], А. Адамсоном.

Визначення адгезії як стану запропоновано Ву Шоухенгом – адгезія – це такий стан двох різнорідних тіл, при якому вони утримуються разом в тісному

міжфазному контакті таким чином, що механічна сила або робота може бути передана через розподільну границю [28].

З точки зору С. А. Немахова [29] перелічені визначення адгезії характеризують одне і теж явище тільки з різних сторін.

Для визначення адгезії існує декілька гіпотез [26, 27, 28, 29]:

- відповідно до абсорбційної теорії Дебрайна і Мак-Ларена адгезія пов'язана з дією міжмолекулярних сил: фізичних, ван-дер-ваальсових або хімічних, наприклад ковалентно-іонних.;

- за електричною теорією Б. В. Дерягіна і Н. А. Кротовой – адгезія пов'язана з різницею потенціалів на границі різнорідних тіл, тобто з виникненням в зоні контакту своєрідного електричного молекулярного конденсатора, обумовленого двійним електричним шаром;

- за електромеханічною теорією адгезія пов'язана з електромагнітною взаємодією, тобто, з випромінюванням та поглинанням електромагнітних хвиль атомами і молекулами, що може реалізуватися в конденсованих тілах;

- електрорелаксаційна теорія Н. Н. Москвітїна стверджує, що адгезія пов'язана з двійним електричним шаром і швидкістю відриву;

- відповідно до дифузійної теорії С. С. Восоцького і Б. В. Дерягіна адгезія пов'язана з дифузією кінців макромолекул через границю початкового контакту, в результаті чого в граничному (кінцевому) випадку границя розділу фаз може зникати;

- за механічною теорією адгезійний контакт утворюється за рахунок механічного зчеплення молекулярних і надмолекулярних утворень з мікронерівностями поверхні;

- за термодинамічною теорією адгезія пов'язана з поверхневим натягом, який викликає, згідно теорії Дюпре, роботу по заміні поверхні розділу тверде тіло-рідина поверхнею тверде тіло-газ. (26, 28)

А. Д. Зимон надає перевагу міжмолекулярній взаємодії і частково кулонівській силі, які визначають першочергове формування зв'язку між двома поверхнями. Сили починають діяти до безпосереднього контакту і деякий період після порушення контакту.

Друга група сил, на відміну від першої, проявляється тільки при контакті двох тіл. Ці сили виступають як наслідок першочергової адгезії і стають потім одною з її причин. До цієї групи відносяться хімічні зв'язки, сили електричної і капілярної взаємодії, а також адсорбція і дифузія, які є наслідком контакту.

При адгезії рідких і пружно-пластичних харчових мас може виникати хімічний зв'язок.

В значній мірі адгезія харчових мас залежить від наявності вологи, яка може проявлятися як капілярна сила.

В зазорі між контактуючими частинами виникає меніск рідини. В такому випадку він ніби стягує частинку і поверхню. Величина адгезії в такому випадку буде визначатися капілярною силою:

$$F_K = 4\pi\sigma_{ж}r$$

де $\sigma_{ж}$ – поверхневий натяг рідини (води), пари якої зконденсовані між контактуючими тілами.

В рідинному середовищі адгезія частин менша ніж на повітрі (Зимон). В даному випадку має місце деяка розклинююча дія тонкого шару рідини, яка знаходиться на поверхні тіл [30]

Узагальнюючи наведені теорії, можна зробити висновок, що адгезія викликана рядом механізмів, які діють на молекулярному і надмолекулярному рівнях та визначаються властивостями цих поверхонь: фізичними, хімічними чи електромагнітними.

За величину, яка оцінює (визначає, вимірює) адгезію, як феменеологічне явище, прийнята сила, яку визначають як силу прикладену перпендикулярно до зразка, яка діє на одиницю площі і достатня для відриву зразку від поверхні:

$$P_a = P / F_0 \quad (2.10)$$

де P – питома сила Н/м²:

P_a – нормальна сила, Н:

F_0 – площа контакту, м².

Оцінки адгезії шляхом відривання плівки і пружно-пластичних мас можна розглядати як: деформації плівки, внутрішніх напруг та інш. В такому випадку доцільно говорити про адгезійну міцність [28].

При відриванні структурованих мас адгезійна міцність вступає в конкуренцію з когезійною міцністю маси. При відриванні проходить деформація і течіння самої маси, яке визначається реологічними властивостями самого продукту. Тобто може бути адгезійного, когезійного та когезійно-адгезійного типу.

Залежність для визначення сили адгезії була визначена М. Ж. Стефаном (Горбатов А. В.):

$$P = \frac{2\eta R^2}{4\tau_0} \left(\frac{1}{h^2_1} - \frac{1}{h^2_2} \right), \quad (2.11)$$

де R – радіус диску, м;

τ_0 – час відриву (розходження дисків) з віддалі h_1 до h_2 , с;

η – в'язкість рідини, Па*с.

Якщо «адгезію» чи «силу адгезії» оцінювати за залежністю (2.11) то такий процес проходить в часі, тобто адгезія оцінюється як процес, який необхідно виконати для відриву зразків, а віддаль розходження дисків (h_1 і h_2) може характеризувати явище когезії.

В даному випадку вважають, що пластини притискаються одна до іншої силою капілярної взаємодії [26]:

$$P = 2\alpha F \cos\beta / h = 2\alpha' F / h, \quad (2.12)$$

де α – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м;

$\cos\beta$ – характеризує змочування пластини;

α' – коефіцієнт поверхневого натягу при повному змочуванні, Н/м;

h – товщина шару продукту, м.

Якщо припустити, що сила прикладена з зовні до пластини збільшується лінійно в часі:

$$P = \omega_c * \tau,$$

де ω_c – швидкість збільшення сили, Н/с;

τ – час, с.

Враховуючи (2.10);

$$P_0 = p_0 * F_0 = \omega_c * \tau_0 \quad (2.13)$$

Приймаючи, що площа контакту також змінюється за лінійним законом, отримаємо:

$$F = F_0 * C\tau, \quad (2.14)$$

де C – коефіцієнт пропорційності, який залежить від властивостей продукту і характеризує темп зменшення площі;

F_0 – біжуче значення площі дійсного контакту, m^2 .

Підставляючи (2.14) у залежність (2.12) одержимо:

$$P' = \frac{p'}{F_0} = \frac{2\alpha \cdot F}{h \cdot F_0} = \frac{2\alpha}{h} \left(1 - \frac{C}{F} \tau\right) \quad (2.15)$$

Враховуючи, що в момент відриву $P = P_0$, а час відриву з формули (2.13): $t_0 = P_0 F / \omega_c$ одержимо:

$$P_0 = \frac{2\alpha}{h} \cdot \frac{\omega_c}{\omega_c + \frac{2\alpha \cdot C}{h}} \quad (2.16)$$

Для зручності рівняння представляють у вигляді (2.14)

$$\frac{1}{P_0} = \frac{h}{2\alpha} \cdot \frac{C}{\omega_c} \quad (2.17)$$

Оскільки, прийнято, що зростання сили і зміна площі контакту лінійно залежать від часу, то можна прийняти, що C / ω_c – є постійною величиною A , тобто:

$$\frac{1}{P_0} = \frac{h}{2\alpha} + A \quad (2.18)$$

і величина адгезії прямо пропорційна поверхневому натягу рідини і обернено пропорційна товщині шару продукту. Залежність (2.18) може мати місце при невеликій товщині шару продукту.

2.5.2. Вплив адгезії тіста на процес нагнітання

Автор [8] дослідив властивості тіста для виробництва бубликів, що має пружні, в'язкі і пластичні властивості, тобто відноситься до пружно – в'язко – пластичних тіл. Відповідно [26, 28] відзначено, що адгезія подібних тіл, як і

когезія частинок, рідин і плівок залежить від площі контакту середовища (адгезив) із шероховатою металевою робочою поверхнею машини. Адгезія виникає в результаті адсорбції молекул середовища (тіста) на поверхні робочого органу в найтоншому (до 20 нм) поверхневому шарі. Одночасно ці молекули зв'язані з основним об'ємом середовища. Тому на всіх стадіях дії валкового робочого органу на відносно переміщення, молекули середовища, які адсорбувалися на його поверхні, обертаються разом із ним (рис. 2.11). Якщо сили міжмолекулярного з'єднання в тісті стають слабші, ніж сили адсорбції, то розрив його маси проходить на деякій віддалі від поверхні валка. Такі зміни у структурі тіста проходять в період затягування, стискання й розкачування у зазорі утвореного між обертовими валками.



Рис. 2.11. Дія адгезії на якість формування тіста на поверхні існуючого валка з прямими пазами: 1 – валок; 2 – залишки прилиплого тіста після розкачування; 3 – бункер з тістом.

Отже, адгезія залежить від реологічних властивостей тіста на момент процесу, ступеня обробки поверхні валкових робочих органів, товщини його шару. Дослідження впливу фізичних і реологічних властивостей середовища та конструктивних особливостей циліндричних валків з пазами на покращення якості виробів при нагнітанні – задача актуальна і нами запропоновано її вирішення у математичних залежностях.

Серед компонентів в'язкого тіста найбільшу енергію адсорбції до металів має вода. Якщо її видалити з поверхні напівфабрикату, то адгезія повинна зменшитися. При цьому інтенсивність випаровування поверхневої вологи повинна бути дуже велика, щоб виникаюча тонка шкоринка на поверхні середовища перешкоджала видаленню вологи з його об'єму. Подібні умови можна отримати [32] тільки при дуже великих швидкостях – витікання середовища під тиском через отвір профільного каналу, утвореного між обертовими валками. Актуальними є виявлення дії поверхні нового робочого органу із гвинтовими пазами (рис. 2.12) на адгезійні властивості середовища.

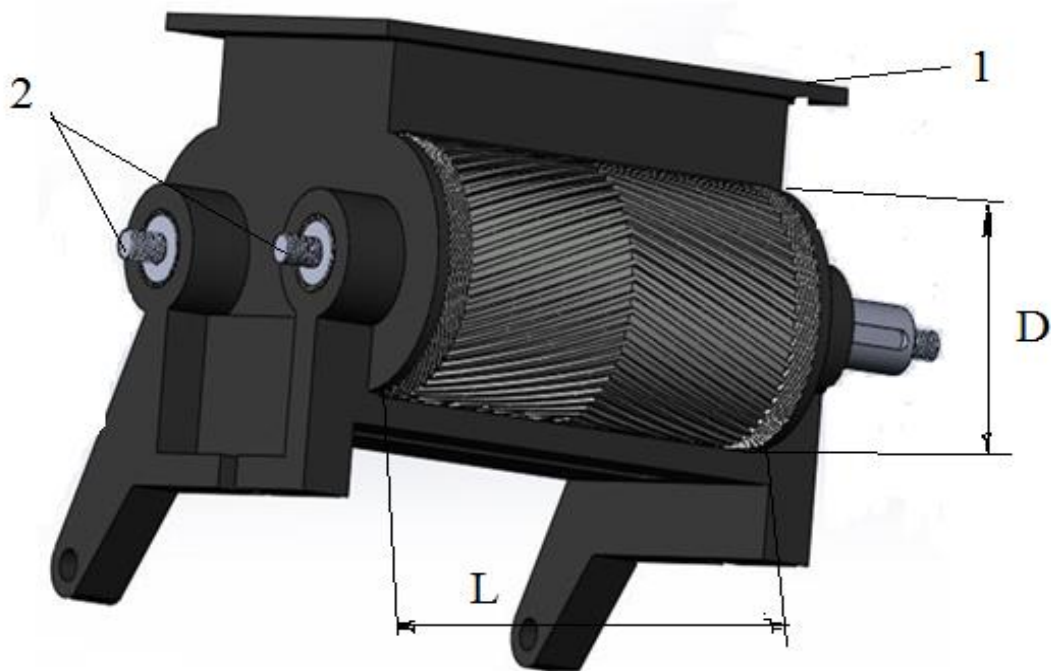


Рис. 2.12. Вузол нагнітання формувальної машини:
1 – робоча камера; 2 – валкові робочі органи

Для рівномірного ущільнення і пересування маси середовища по поверхні валкових робочих органів встановлюється зазор між ними, який регулює і згладжує одержані деформації. Дані деформації залежать від виду середовища і вимог до готової продукції. Тому, швидкість течії переміщення шару середовища по поверхні валків буде практично рівнятися його швидкості. Відповідно ковзання на поверхні валків можна не враховувати ще й тому, що поверхня має нанесені рихлі.

Тісто, вологістю 33%, для бубликів із пшеничного борошна вищого сорту на пресованих дріжджах, готувалося безопарним способом з тривалістю

бродіння 60 хвилин при температурі 32–33°C. Якість пресованих дріжджів відповідає ДСТУ. Характеристики борошна пшеничного:

- масова частка вологи, % – 14,5;
- вміст сирої клейковини, % – 28;
- опір клейковини стисненню на приладі ІДК-1, од.прил. – 54;
- розтяжність клейковини, см – 14.

Дослідження процесу нагнітання тіста виконувалось на формувальній машині Б-54 кондитерської фабрики (Тернопіль). Адгезію визначали шляхом відриву тіста від поверхні, вимірюючи зусилля відриву. По цьому зусиллю розраховували адгезійну стійкість тіста. Тому адгезійна стійкість $f_{\text{від}}$ (рівна відношенню зусиль відриву взірця $F_{\text{від}}$ до площі номінального контакту $S_{\text{нк}}$) і залежить від розмірів поверхні і адгезиву, умов контакту і відриву тіста. Адгезію розглядали як процес, який проходить в часі при виникненні або порушенні контакту поверхонь двох різнорідних тіл. За величину, що кількісно оцінює адгезію, використовували роботу відриву (міцність) та нестабільний процес заповнення середовищем (тістом) виїмок поверхні валка при тиску попереднього навантаження P_k .

Одночасно проводили визначення показників фізичних властивостей тіста. В'язко-пластичні властивості тіста визначали за допомогою ротаційного віскозиметра «Реотест-2» із двома коаксіальними циліндрами, використовуючи циліндр S2 та повний діапазон швидкостей обертання ротора в режимі аІ. Напруження зсуву τ (Па) визначали за формулою:

$$\tau = z \cdot \alpha,$$

де α – показники на шкалі приладу;

z – постійна, значення якої залежить від циліндриків, що застосовуються.

Динамічну в'язкість η (Па·с) визначали за формулою:

$$\eta = 0,1 \cdot (\tau / \gamma)$$

Для визначення залежностей швидкості зсуву від напруження зсуву і динамічного напруження зсуву, використано закон течії в'язко-пластичного середовища Шведова, метод Бранопольської.

Силу тиску на поверхні валка визначили шляхом реєстрації її зміщення за допомогою комп'ютера з інтегрованою програмою «Power Graph» як персонального самописця, сигнали до якого подавалися від вмонтованого резистора як датчиків і реєструвалися через пристрій вводу з ілюстрацією на моніторі. Програму та довідник з її використання можна завантажити на сайті www.powergraph.ru (безкоштовна робоча версія 2.1). Мінімальні потреби при установці програми: операційна система – Windows (98, ME, 2000, XP, Vista); операційна пам'ять – 32 Мб; вільного місця на жорсткому диску – 50 Мб. Для запису сигналів у програмі «PowerGraph» необхідно заздалегідь вибрати відповідний драйвер пристрою АЦП (наприклад Joystick).

Явища адгезії на перших стадіях нагнітання (затягування) пояснюються теорією адсорбції і дифузії, тобто адсорбційними діями (ван-дер-ваальсових) сил на поверхні валка. Таким чином, для правильного дотримання режимів нагнітання необхідно вимірювати сили адгезії і керувати ними. При цьому потрібно з'ясувати міцність адгезії, моделювання умов утворення адгезійних сил у робочій камері машини з урахуванням як виду і стану поверхні, так і структурно-механічних властивостей тіста.

Отже довжина зони деформації: $l = \sqrt{R\Delta h}$ постійно має контакт із масою тіста і відповідно складову адгезії. При рухомій поверхні обертових валків виконується загальна робота, яка складається із пружних сил та зміни контакту рухомого тіста: $A_{\text{заг}} = A_{\text{пр}} + A_{\text{к}}$.

Робота пружних сил:

$$A_{\text{пр}} = S_{\text{нк}} \cdot (l_1 - l_0).$$

Питому роботу 1 кг тіста (в Дж) можна обчислити за формулою:

$$A_{\text{п}} = \frac{A_{\text{з}}}{m_{\text{ср}} \cdot 10^3},$$

де $m_{\text{ср}}$ – середня маса тіста між поверхнями обертових валків, кг:

$$m_{\text{ср}} = \frac{V}{v},$$

де v – питомий об'єм; V – об'єм камери.

Робота, яка витрачається на зміну контакту рухомого шару середовища з поверхнею робочої камери та валків на подолання адгезії і деформації середовища $A_{\text{деф}}$, буде:

$$A_{\text{від}} = A_{\text{ад}} + A_{\text{деф}} = F_{\text{від}} dx = F_{\text{ад}} dh + F_{\text{деф}} dh \quad (2.19)$$

де, $F_{\text{ад}}$, $F_{\text{деф}}$ – зусилля адгезії і деформації; h – товщина середовища на поверхні валка при відриві його шару на подальший технологічний процес-формування; $F_{\text{від}}$ – зусилля відриву шматка середовища від поверхні валка.

Розглянемо складові, формуючі роботу відриву:

$$F_{\text{ад}} = \int_0^l f_{\text{ад}} r dl = f_{\text{ад}} \cdot rl^2 \quad (2.20)$$

Деформація середовища визначається:

$$F_{\text{деф}} = \tau_0 \frac{V_{\text{від}}}{h} rl \quad (2.21)$$

де $V_{\text{від}}$ – швидкість відриву середовища від поверхні валка під дією зовнішніх сил;

τ_0 – дотичні напруження;

η – пластична в'язкість середовища;

r – шар тіста на валку;

l – довжина контакту частини робочого органу.

Враховуючи довжину зони контакту, одержимо вираз:

$$F_{\text{деф}} = \tau_0 \frac{V_{\text{від}}}{h} rl = \tau_0 \frac{V_{\text{від}}}{h} r \sqrt{Rh}$$

Робота, яка визначається зусиллям відриву, затрачується на подолання адгезії $F_{\text{ад}}$ і деформації середовища, при виході через прямокутну формуючу поверхню між обертовими валками $F_{\text{деф}}$

$$F_{\text{від}} = F_{\text{ад}} + F_{\text{деф}} \quad (2.22)$$

Площа номінального контакту

$$S_{\text{нк}} = 2\pi R \frac{1}{8} \left(2l + \frac{2}{5} R \right) \quad (2.23)$$

із врахуванням відношень (2.20) і (2.22)–(2.23) зусилля відриву буде у вигляді

$$F_{\text{від}} = S_{\text{нк}} \left(f_{\text{ад}} + \tau_0 \frac{V_{\text{від}}}{h} \right) \quad (2.24)$$

Відношення (6) справедливе для контакту з ідеально гладкою робочою поверхнею. На основі рівняння (2.20), (2.24) визначаємо вплив на адгезійну стійкість ряду факторів, які піддаються експериментальному визначенню на наших валках ($\tau, h, \tau_0, V_{\text{від}}$)

Проаналізуємо вплив швидкості на процес відриву шматка тіста від поверхонь машини. При $V_{\text{від}} \rightarrow 0, F_{\text{від}} \rightarrow S_{\text{нк}} f_{\text{ад}}$ для гладкої поверхні і $F_{\text{від}} \rightarrow \alpha S_{\text{нк}} f_{\text{ад}}$ для валкового робочого органу. α – коефіцієнт формування площі контакту, який визначається добутком $\alpha = \zeta \cdot \varepsilon$

Якщо порівняти вплив швидкості відривання на міцність адгезії з теоретичними результатами (рис. 2.13), можна зробити висновок, що міцність адгезії із збільшенням швидкості зростає нерівномірно. Для малих швидкостей це відбувається значно інтенсивніше, ніж для великих. Таким чином, експериментальне визначення адгезії тіста в процесі його відривання від поверхні валка показало, що по-перше, швидкість обертання валка має дотримуватися параметрів $v=0.02-0.03 \text{ с}^{-1}$; по-друге, зазор між обертовими валками має бути 20...30 мм. Такі параметри визначають режим оптимального нагнітання в робочій камері машини.

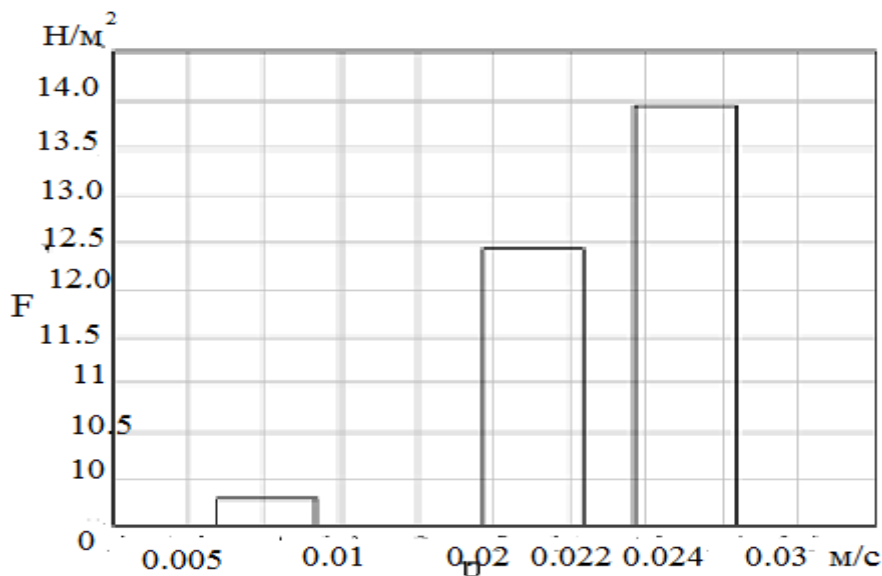


Рис. 2.13. Залежність міцності адгезії від початкової швидкості відривання

За допомогою даних умов можна визначити дійсну адгезію по результатах адгезіометрії при незначних швидкостях відриву тіста, коли $V_{від} \rightarrow 0$. Ці умови повністю відповідають процесам, що відбуваються на стадії розкачування. Крім цього, нам відома фактична площа контакту фаз. Мінімальна фактична площа контакту $S_{нк}$, утворена контактом тіста з поверхнею валка, де $\alpha=1$. Максимальна площа контакту рівна площі поверхні валка (субстрату) S_c . (рис. 2.14)

$$S_{нк} \leq S_{фк} \leq S_c$$

Номінальну площу контакту легко визначити по геометрії адгезиву або субстрату. Площа субстрату із урахуванням рельєфної поверхні (залежить від частоти і виду її обробки рис. 2.14, вид А) нам відома. Тому, в загальному вигляді рельєф поверхні із стороною a можна записати двійним рядом Фур'є:

$$Z = \sum_{m,n=1}^{\infty} a_{m,n} \sin \frac{\pi m x}{a} \cos \frac{\pi n y}{a} \quad (2.25)$$

де Z – значення висоти нерівностей;

a_{mn} – коефіцієнти Фур'є;

x, y – декартові координати;

m, n – номери гармонік.

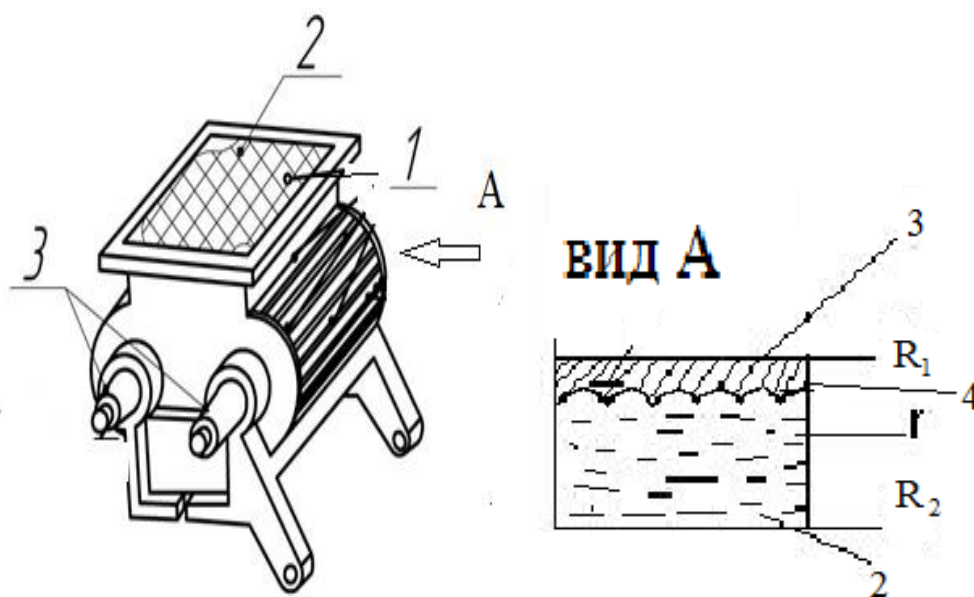


Рис. 2.14. Схема вузла нагнітання: 1 – робоча камера; 2 – тісто; 3 – валки; А – визначення фактичної площі контакту валкового робочого органу тіста: 2 – адгезив (тісто); 3 – субстрат; 4 – поверхня субстрату

Сили адгезії в цих випадках дуже малі.

Вираз (2.25) характеризує профіль будь-якої поверхні. Вибираємо на поверхні елемент площею ds :

$$ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} + \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} dx dy$$

Знаючи форму профілю, тобто dz/dx і dz/dy , можна шляхом інтегрування визначити S_c із урахуванням рельєфу поверхні. Так, як рельєф поверхні валкового робочого органу має пази із відповідним кутом, то кут вершини між пазового виступу $\gamma=60^\circ$ при вершині трапеції. В будь-якому довільно вибраному січенні рельєф має вигляд рівносторонньої трапеції (рис. 2.15). Тоді довжина утвореної профілем поверхні у 2 рази збільшить довжину середньої лінії профілю. Відповідно, площа поверхні субстрата буде в 2 рази більша номінальної площі контакту.

В реальних умовах тісто не повністю контактує із поверхнею валкового робочого органу. Згідно роботи [8], повнота заповнення шорсткої поверхні пропорційна тиску і часу контакту тіста, а також його в'язкості:

$$h/d \sim (p_k t_k / \eta)^{1/2}$$

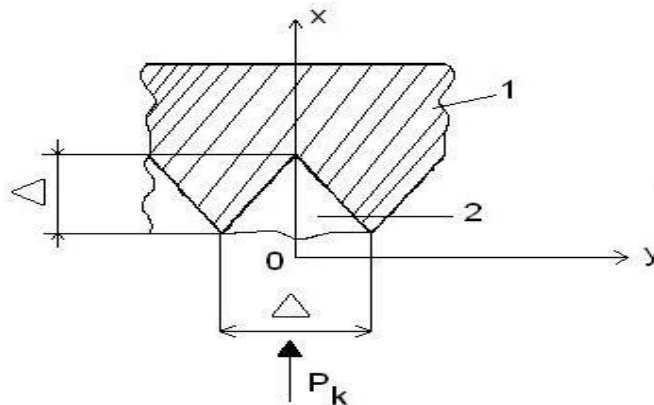


Рис. 2.15. Заповнення каверни на поверхні субстрату 1 адгезивом 2

Можна припустити, що тісто контактує із широкотою поверхнею при контактному тиску P_k . Широковатість валка характеризується середньоквадратним значенням нерівностей R_z . При цьому каверна на поверхні валка заповнена тістом (рис. 2.14) Якщо розміри макромолекул тіста значно менші

виїмок поверхні, то на течію тіста в машині розповсюджується закон механіки суцільних середовищ і проходить двовимірний течійний рух.

В даному випадку сили інерції відповідно малі, а сили гідростатичного тиску, в'язкого тертя і капілярні, взаємно врівноважені. В таких умовах для одержання основних критеріїв подібності даної течії достатньо розглянути одновимірне рівняння руху тіста. При ізотермічній течії, коли значення температури тіста і валків рівні (це видно із дослідів) рівняння руху має вигляд:

$$Q = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (2.26)$$

де p – тиск;

x, y – декартові координати;

τ_{xy} – дотична напруження;

ρ – густина тіста.

На вільній поверхні тіста виконуються умови безперервності нормальних і відсутність дотичних напружень.

Позначимо радіус кривизни адгезиву на поверхні субстрату (рис. 5) Δ , тоді умова безперервності нормальних напружень по формулі Лапласа має вигляд:

$$\tau_x = \frac{\delta_{nn}}{\Delta} \quad (2.27)$$

де δ_{nn} – поверхневий натяг на границі адгезив – поверхня.

Реологічні властивості тіста в області малих швидкостей деформації, а саме при проходженні через зазор між обертовими валковими робочими органами, характеризується рівнянням Шведова-Бінгама [31, 32]

$$\tau = \tau_0 \sin j = \eta_{nl} j \quad (2.28)$$

де τ_0 – умовна границя текучості;

η_{nl} – пластична в'язкість;

j – градієнт швидкості деформації.

Дотичне напруження в напрямку xx визначаємо відповідно:

$$\tau_{xx} = 2B \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.29)$$

де $B = \tau/A + \eta_{nl}$; A – другий інваріант тензора швидкостей деформації, одержаний для одновимірної течії із відношення:

$$A = \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.30)$$

Враховуючи (2.28)–(2.30) і рівняння (2.26) та граничні умови (2.27) можна записати рівняння у вигляді:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} (\tau_0 + \eta_{nl} \frac{\partial v}{\partial x}) = 0; \quad (2.31)$$

$$2(\tau_0 + \eta_{nl} \frac{\partial v}{\partial x}) = \frac{\delta_{AB}}{\Delta} \quad (2.32)$$

Замінивши диференціали характерними значеннями ($p \approx p_k$; $y - \Delta$; $x \approx \Delta$; $v \approx \Delta/t$); одержимо безрозмірні компоненти:

$$N_1 = \frac{\delta_{AB} t_k}{\Delta \eta_{nl}}; \quad N_2 = \frac{\tau_0 t_k}{\eta_{nl}}; \quad N_3 = \frac{p_k t_k}{\eta_{nl}}; \quad (2.33)$$

Критерій N_1 , характеризує відношення сил поверхневого натягу і в'язкого тертя; N_2 аналог критерію Сен-Венана для умов нестационарного руху (течії); N_3 - враховує вплив тиску контакту і в'язкого тертя. Таким чином, повнота доповнення пазами робочого органу $S_{\phi,k}$ змінюється від S_{nk} до S_c в залежності від відношення параметрів критеріїв N_1, N_2, N_3 . Дані критерії, як і ряд інших впливають на нагнітання відповідно до кожного певного періоду відповідної стадії процесу. Із критеріальних рівнянь видно, що велике значення має пластична в'язкість тіста. На перших хвилинах процесу контакти середовища з поверхнею валкового робочого органу проходять по основному принципу

повільної пластичної деформації. При збільшенні тривалості контакту з присутнім тиском контактування, адгезійна пружність зростає, в основному, за рахунок пластичної течії і визначається величиною пластичної в'язкості. На виході із формувального каналу утвореного валками критерій N_3 втрачає свої значення і відбувається якісний відрив заданої маси тіста до формувального пристрою. Одночасно два критерії N_1 і N_2 продовжують впливати на основну масу тіста, яка знаходиться на валку, зберігаючи свої пластичні властивості і тим самим забезпечує чистоту поверхні (рис. 2.16).

Для забезпечення постійної площі фактичного контакту, що сприяє кращій адгезії, і відповідно, проходженню якісного процесу затягування, стискання і розкачування, необхідною умовою являється постійність критеріїв (2.33). Це означає, що фактична площа контакту $S_{ф.к}$, змінюється від $S_{ик}$ до S_c в залежності від відношення параметрів. Тому, для додержання вимог процесу, зазор між обертовими валками встановлюється на відповідній віддалі для створення формуючого каналу, що відповідає теоретичним і практичним розрахункам.

В таких умовах проходять якісно стадії процесу у вузлі нагнітання за рахунок великих напружень деформацій. Дані умови повинні тривати певний період стадії нагнітання. Тому вплив адгезії має бути мінімальний.

Змінити сили адгезійних зв'язків можна лише, у випадку, якщо товщина шару тіста буде достатньо малою і при відділенні від поверхні валів має бути чистою.



Рис. 2.16. Фотографія чистоти поверхні робочого валка нової конструкції:
1 – валок з гвинтовими пазами; 2 – корпус машини

2.6. Обчислення міцності адгезії

Силова взаємодія середовища з валком відбувається по його поверхнях після дискретного нагнітання маси тіста. Оскільки спосіб утворення та форма профілів взаємодії тіста із поверхнею валка має значний вплив на якісні характеристики та процес нагнітання, проведено ряд порівняльних досліджень для визначення раціонального перерізу шорсткості валка.

Збільшити силу адгезії між в'язким середовищем і ведучим валковим робочим органом можливо за рахунок збільшення кута охоплення у відповідності до відомої закономірності Ейлера:

$$S_{наб} = S_{наг} e^{\alpha f}$$

де $S_{наб}$ і $S_{наг}$ – відповідно зтягування в точках набігання середовища і його збігання із шорсткісною поверхнею;

α – кут охоплення середовищем;

f – коефіцієнт тертя в парі матеріалів.

Зміна кута охоплення середовища досягається за рахунок геометричної орієнтації зтягування і його нагнітання. Задача геометричного синтезу системи зі збільшенням кута охоплення середовища вирішується на основі геометричних зв'язків. Розглянемо випадки силової взаємодії, при яких лінії вершин шорсткості валка:

- паралельні вектору швидкості нагнітання v_p і коловій силі P_{KB} (кут $\alpha=0^\circ$);
- не паралельні вектору швидкості нагнітання v_p і коловій силі P_{KB} (кут $\alpha>0^\circ$).

Кут α залежить від підйому шорсткості (рис. 2.18). Рух валка в середині під час його нагнітання можна розкласти на 3 складові:

прямолінійний горизонтальний в напрямку від осі валка до внутрішньої поверхні його корпусу, зумовлений відцентровою силою $P_{ВБ}$;

- обертальний горизонтальний в напрямку обертання валка зумовлений коловою силою P_{KB} ;

- прямолінійний вертикальний від дії сили тяжіння на тісто шару тіста, що знаходяться над ним $P_{ТЖ}$.

За рахунок цих рухів на верхній та нижній передніх шорсткостях поверхні валка виникають сили тертя (адгезії). Описані вище три складові руху тіста відповідають обраним координатним осям XYZ декартової системи

координат (рис. 2.17). Тобто, напрямок осі OX (вертикальна вісь) співпадає з напрямком сили тяжіння, $PT_{ж}$, OY (горизонтальна вісь) з напрямком дії відцентрової сили $P_{ВБ}$, OZ (ортогональна вісь) з напрямком колової швидкості $v_{КБ}$, колової сили $P_{КБ}$ та сили стискання тіста $P_{СТ}$. При усталеному режимі роботи приймаємо, що колова швидкість $v_{КБ}$ буде рівною швидкості нагнітання v_p ($v_{КБ} = v_n$).

У випадку $\alpha = 0^\circ$ вертикальна координатна площина XOY буде перпендикулярна до площини, що проходить через лінії шорсткості до її передньої поверхні. Якщо $\alpha > 0^\circ$, то кут між вищевказаними площинами становитиме $90^\circ \pm \alpha$.

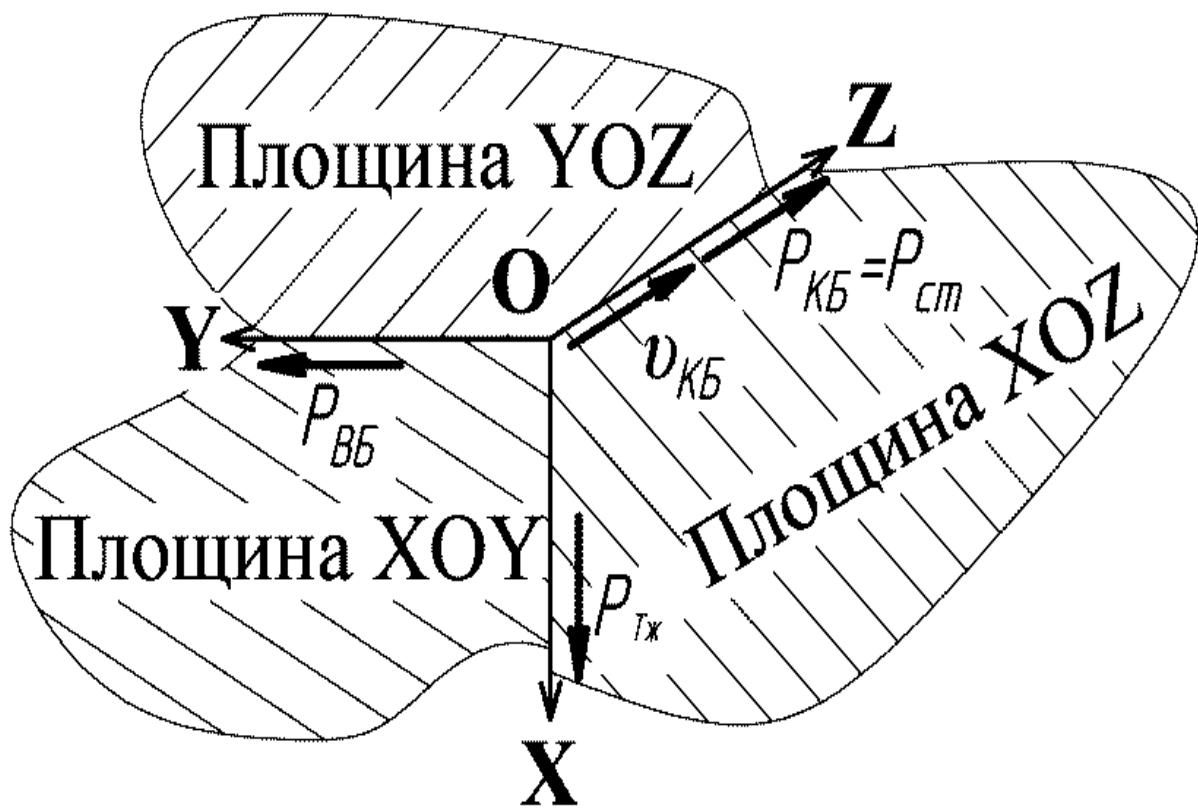


Рис. 2.17. Система координат, в якій розглядали силову взаємодію:

$P_{ВБ}$ – відцентрова сила; $P_{Тж}$ – сила тяжіння; $P_{КБ}$ – колова сила, що діє на тісто;
 $P_{СТ}$ – сила, що стискає тісто; $v_{КБ}$ – колова швидкість

Для порівняння було обрано два трикутники (рівносторонній трикутник, рівнобедрений трикутник з кутом при вершині 75° , поперечні перерізи шорсткості площею 1.2 мм^2 кожен (рис. 2.18).

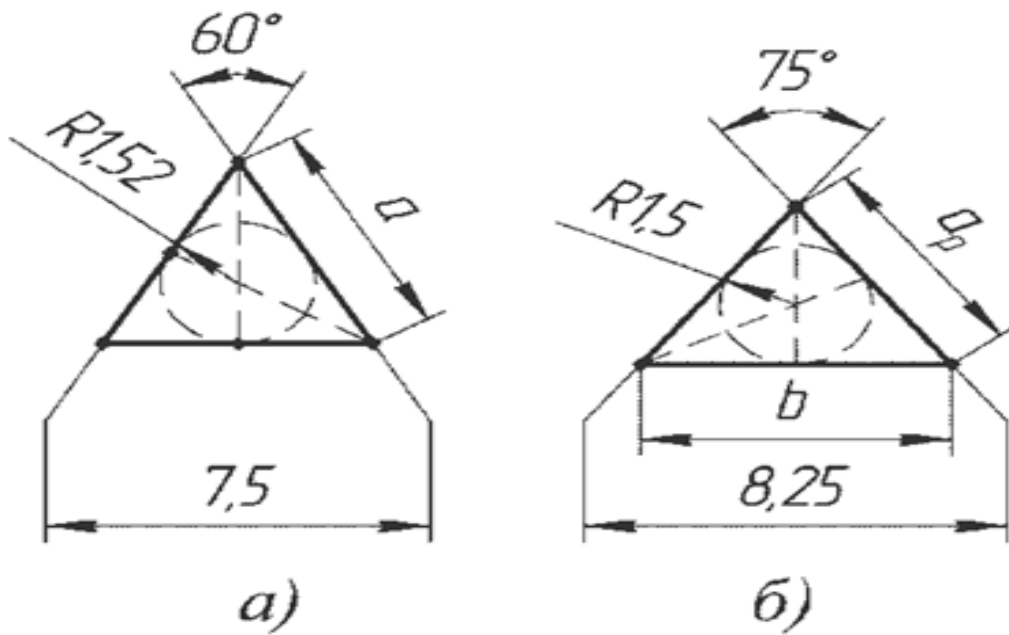


Рис. 2.18. Поперечні перерізи шорсткості різних профілів площею 1.2 мм² кожен: а) трикутний, рівносторонній; б) трикутний, рівнобедрений

Для рівностороннього трикутника площею S довжина сторони a визначається за формулою:

$$a = \sqrt{\frac{S}{\frac{\sqrt{3}}{4}}} \quad (2.34)$$

Для рівнобедреного трикутника площа (S) визначатиметься за формулою:

$$S = \frac{1}{2} a_p b \sin \alpha$$

де: a – бокова сторона трикутника;

b – основа трикутника;

α – кут між боковою стороною і основою (для рівнобедреного трикутника з кутом при вершині 75° $\alpha=52,5^\circ$).

З теореми про проекції визначимо b :

$$b = 2a_p \cos \alpha \quad (2.35)$$

Підставивши рівняння (2.35) в формулу (2.34) і виразивши a отримаємо:

$$a_p = \sqrt{\frac{S}{\cos \alpha \cdot \sin \alpha}}$$

При $S = 1.2 \text{ мм}^2 \rightarrow a_p = 0.498 \text{ мм}, b = 0.606 \text{ мм}.$

Враховуючи хаотичну взаємодію тіста при його переміщенні, де зміна взаємодії відбувається між широкооватою поверхнею в просторі поверхні валка, складено задачу планування експерименту із використанням повно факторного експерименту другого порядку. При двох факторах модель функції експерименту має вид: $y = f(x_1, x_2)$

За результатами експерименту отримуємо регресійне рівняння другого порядку.

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{12} X_1 X_2$$

Для проведення дослідів складено план з відповідними матрицями планування експерименту з числом дослідів та межі зміни факторів. Матриця представляє собою перелік варіантів взятих в даній серії дослідів. Незалежні перемінні було вибрано з аналізу характеру впливу на зміну кута контакту тіста із валком (формули № 2.35). В якості параметра оптимізації використано сторону a та площу контакту широкооватої поверхні S . Відповідно прийнято:

X_1 – довжина сторони a ;

X_2 – площу контакту широкооватої поверхні S .

Експерименти проводились на базі математичного планування. Визначивши які фактори впливають на зміну кута контакту визначаємо їх рівні варіювання та крок варіювання. Основні фактори і рівняння їх варіювання подано у таблиці 2.3.

Вихідними параметрами були:

Y_1 – зміна кута взаємодії тіста по висоті його переміщення в зазорі між широкооватостями. Висота переміщення маси тіста фіксувалася методом візуального контролю по шкалі, нанесеній на робочий валок.

Y_2 – зміна кута взаємодії тіста по його площі контакту на поверхні валка. Маса тіста фіксувалася методикою візуального контролю згідно фотографій.

Таблиця 2.3

Основні фактори і рівняння їх варіювання

Характеристика плану	Перемінні фактори	Перемінні фактори
	довжина сторони a X_1 , мм	площу контакту широховатої поверхні $X_2, \text{мм}^2$
Основний рівень, $X_1^{(0)}$	4.5	12
Крок варіювання	1.5	3
Нижній рівень $X_1^{(-)}$ (-1)	3	9
Верхній рівень, $X_1^{(+)}$ (+1)	6	16

Таблиця 2.4

План експерименту та його результати

X_1 (a, мм)	X_2 (S, мм ²)	Y_1	Y_2
3	9	30	5,6
4,5	9	35	7
6	9	40	9
3	12	45	9,8
4,5	12	50	10
6	12	64	10,8
3	16	60	11
4,5	16	68	11,6
6	16	75	12,4

Використовуючи одержані дані коефіцієнтів регресії, складемо рівняння регресії для Y_1 та Y_2

$$Y_1 = -54,39 - 3a + 12,07S + 0,59a^2 + 0,21aS - 0,33S^2$$

$$Y_2 = -17,43 + 0,8a + 3,31S + 0,11a^2 - 0,09aS - 0,09S^2$$

$$Y_1 = f(a, S)$$

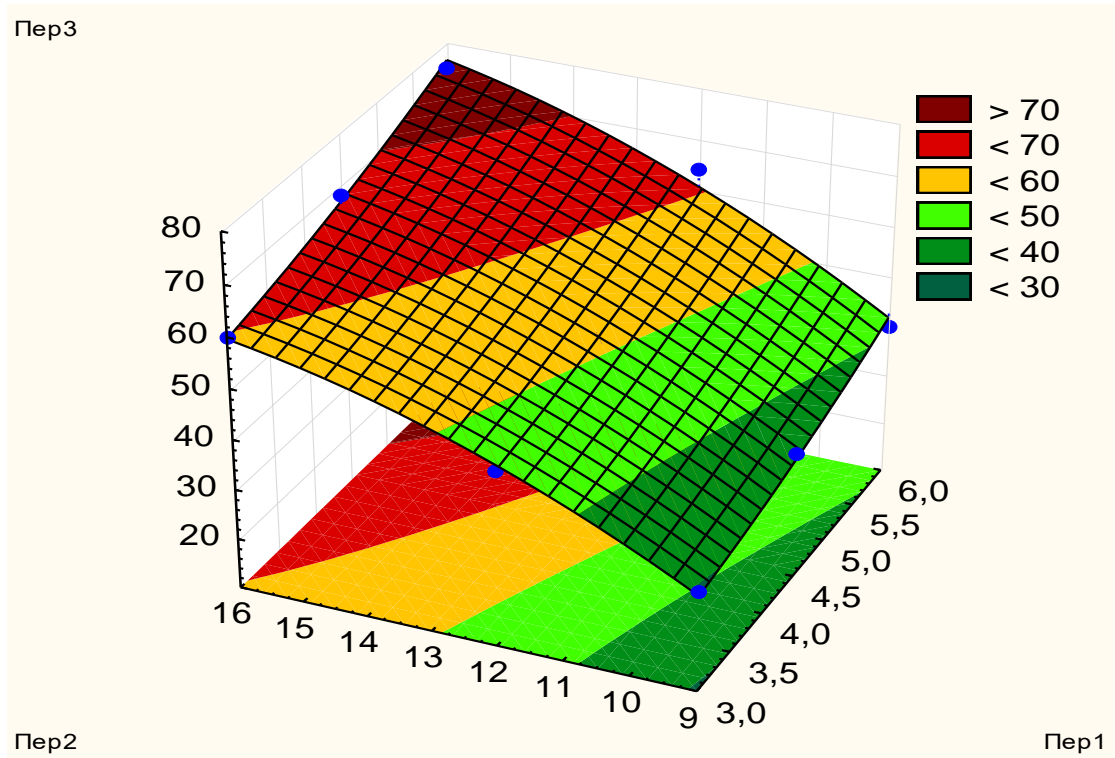


Рис. 2.19. Двомірний переріз поверхні відгуку як функція $Y_1 = f(a, S)$

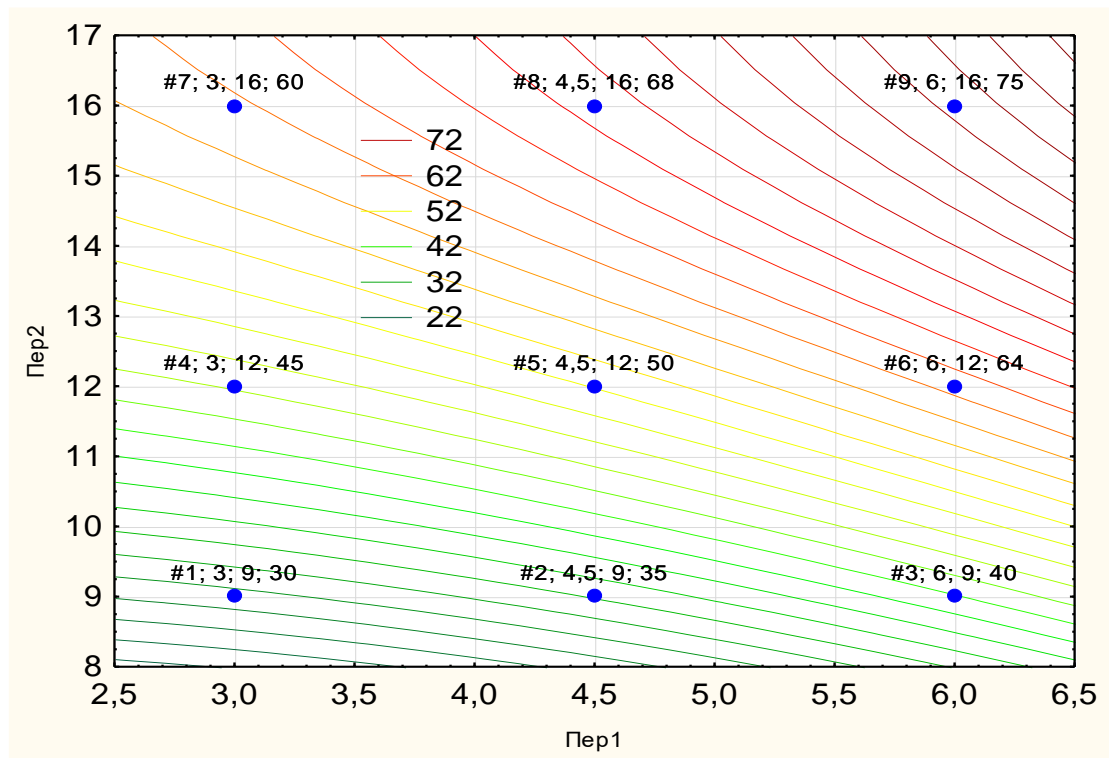


Рис. 2.20. Поверхня відгуку $Y_1 = f(a, S)$

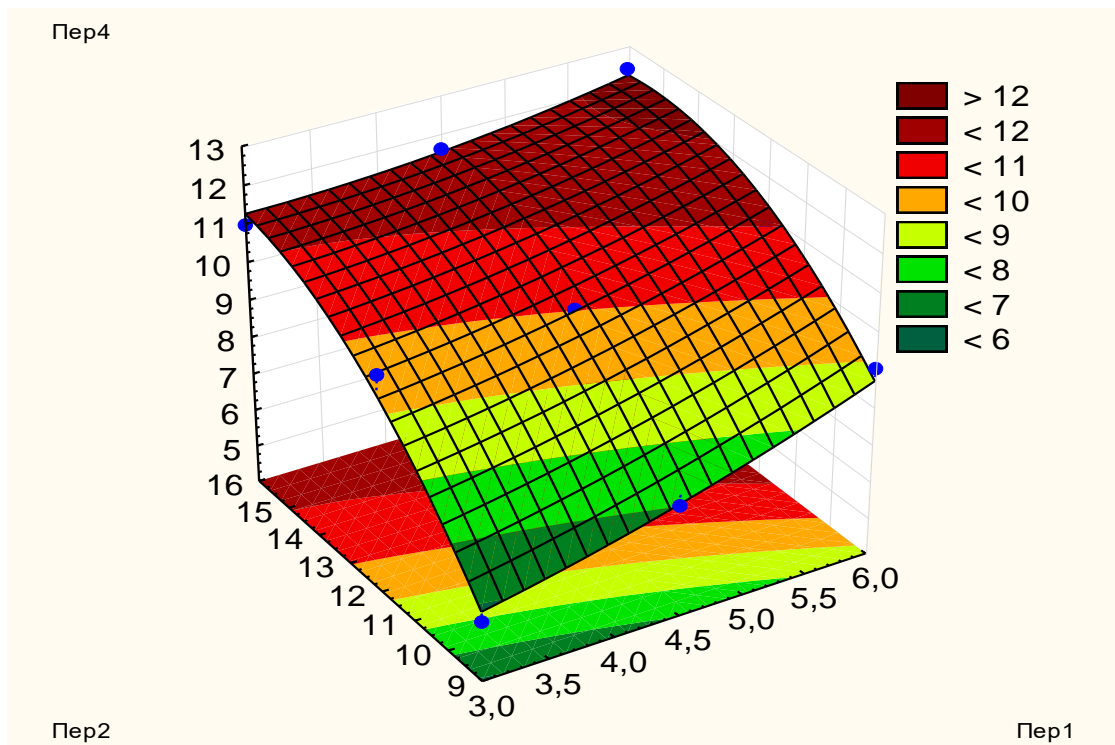


Рис. 2.21. Двомірний переріз поверхні відгуку як функція $U_2 = f(a, S)$

Результати проведених обчислювальних експериментів дозволили дослідити вплив зміни кута шорсткості поверхні валка на взаємодію з тістом. З проведених досліджень чітко видно, що кут шорсткості поверхні при взаємодії з тістом впливає на адгезійні властивості. Такий підхід дозволяє визначити раціональні конструктивні параметри, які сприяють інтенсифікації процесу нагнітання тіста.

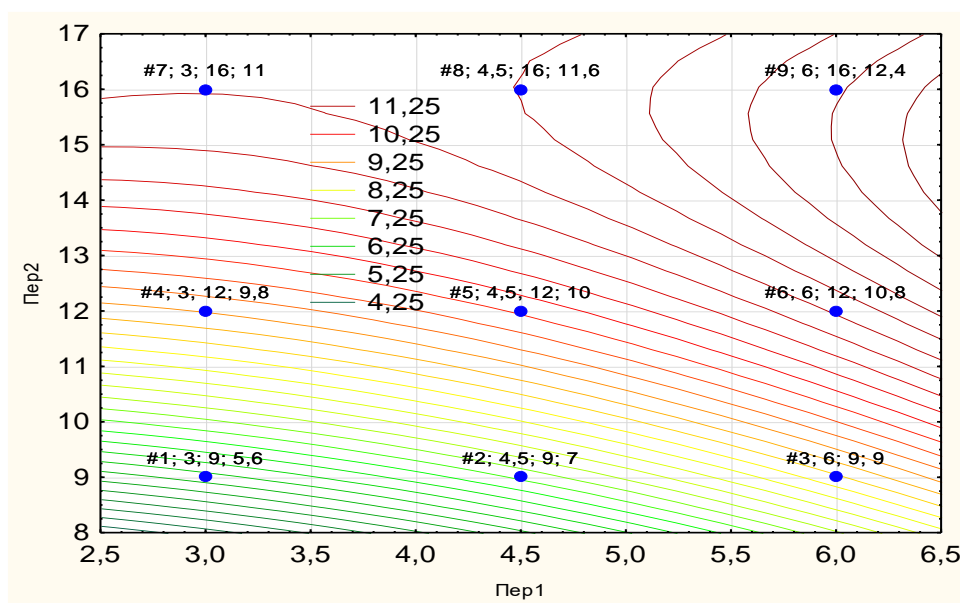


Рис. 2.22. Поверхня відгуку $U_2 = f(a, S)$

2.6.1. Методика визначення міцністю адгезії

Під міцністю адгезії треба розуміти прояв адгезії залежно від таких факторів, як швидкість відокремлення, тривалість і тиск попереднього контакту, площа контакту та ін. Треба розрізняти силу адгезії, яка вимірюється у Н (Ньютон), і міцність адгезії – Н/м:

Взаємодія на границі двох фаз, тобто тіста і поверхні валків, відбувається із перших секунд роботи формувальної машини. Тому явище змочування валкової поверхні зв'язане з співвідношенням поверхневих натягів (σ) адгезиву і субстракта. Для досягнення змочування на поверхні валка з гарною адгезією необхідно передбачити щоб поверхневий натяг субстракта був більший поверхневого натягу адгезива. Це дозволить прискорити процес в цілому при відповідному зменшенні витрат енергоресурсів.

Дослідженнями, проведеними авторами, встановлено, що міцність адгезії тіста при швидкостях його відокремлення від валкового робочого органа формувальної машини більше ніж 1 м/с не визначалась. Пов'язано це, у першу чергу, з відсутністю в моделюванні існуючих процесів формування, транспортування тіста, що здебільшого відбувається при відносно невеликих швидкостях руху робочих органів формувальної машини.

Для правильного дотримання режимів нагнітання тіста валками необхідно вимірювати сили адгезії і керувати ними. При цьому потрібно з'ясувати міцність адгезії, моделювання умов утворення адгезійних сил у робочій камері машини з урахуванням як виду і стану поверхні, так і структурно-механічних властивостей тіста.

Виміряти силу адгезійних зв'язків можна тільки тоді, коли товщина шару тіста буде малою, а при відриві від поверхні валка вона буде чистою. Такий відрив адгезиву від субстрату називають адгезійним і сили адгезії в цьому випадку дуже малі. Враховуючи це, згідно з розробленою методикою, ми визначили міцність адгезії тіста при його виході із профільного каналу в момент відриву від поверхні валків.

При дослідженнях вимірювали довжину польоту тіста після виходу із профільного каналу. Знаючи масу тіста, площу його контакту з поверхнею валка, за допомогою запропонованої моделі й методів комп'ютерної символічної математики визначили міцність адгезії.

При дослідженні процесу нагнітання однією з його умов була зміна зазору між валками та кутової швидкості його обертання. Початкові швидкості виміряні в зоні стискання при трьох значеннях зазору. Траєкторія руху маси

тіста подана на рисунку А 1 (Додатку А). Аналіз траєкторії руху свідчить про те, що із збільшенням зазору, а відповідно зменшенням швидкості і коефіцієнту опору K , довжина x зменшується непропорційно.

Для трьох випадків складемо рівняння сплайнової апроксимації:

$$v_0 = 0.18 \text{ м/с} \quad K = 4.58x^2 - 3.25x + 2.7. \quad (2.36)$$

$$v_0 = 0.32 \text{ м/с} \quad K = 3.65x^2 - 2.9x + 2.69. \quad (2.37)$$

$$v_0 = 0.4 \text{ м/с} \quad K = 2.29x^2 - 2.26x + 2.73. \quad (2.38)$$

Графік залежності між коефіцієнтом опору K і довжиною x подано на рисунку А 2 (додатку А). Експериментально визначивши величину x , підставивши її в апроксимаційні рівняння, можна визначити коефіцієнт опору K , що є сумою:

$$K = K_{\Pi} + K_{ad}, \quad (2.39)$$

де K_{Π} – складова коефіцієнту опору, що враховує протидію повітря;

K_{ad} – складова, що враховує адгезію.

Коефіцієнт опору повітря вважатимемо 0.11.

Отже, підставимо $x=0.3$ в рівняння апроксимації (2.38):

$$K = 2.29(0.3)^2 - 2.26 \cdot 0.3 + 2.73 = 2.26$$

Із (2.39) знайдемо коефіцієнт адгезії, який у нашому випадку буде:

$$K_{ad} = K - K_{\Pi} = 2.26 - 0.11 = 2.15 \frac{H \cdot c}{m}$$

Відповідно до обраної моделі руху вважатимемо, що завдяки адгезії з'явилася сила опору, спрямована проти руху маси тіста, що дорівнює:

$$P_{on} = K_a \frac{\partial x}{\partial t}. \quad (2.40)$$

Оскільки для обчислень обрано вісь x , тоді:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = v_0 \cdot \cos \alpha . \quad (2.41)$$

Підставивши (2.40) у (2.41), отримаємо:

$$P_{on} = K_a v_0 \cos \alpha . \quad (2.42)$$

Знаючи величини $K_a, v_0, \cos \alpha$, визначимо:

$$P_{on} = 2.15 \cdot 0.4 \cdot \cos(15^\circ) = 0.831 \text{ Н}.$$

Для визначення міцності адгезії необхідно знайти площу контакту:

$$S = 2\pi R \frac{1}{8} \left(2b + \frac{2}{5} R \right) = 2\pi 0.11 \frac{1}{8} \left(2 \cdot 0.2 + \frac{2}{5} 0.11 \right) = 0.0343 \text{ м}^2$$

Тоді міцність адгезії буде:

$$F_{ad} = \frac{P_{on}}{S} = \frac{0.831 \text{ Н}}{0.0343 \text{ м}^2} = 24.2 \text{ Па}.$$

Якщо порівняти вплив швидкості відривання на міцність адгезії з результатами, можна зробити висновок, що міцність адгезії із збільшенням швидкості зростає нерівномірно. Для малих швидкостей це відбувається значно інтенсивніше, ніж для великих. Таким чином, експериментальне визначення адгезії тіста в процесі його відривання від поверхні валка показало, що по-перше, швидкість його обертання має дотримуватися параметрів $v=0,18-0,2 \text{ с}^{-1}$; по-друге, зазор має бути не більшим 30 мм. Такі параметри визначають режим оптимального нагнітання, які ми розглянемо в наступних розділах (4, 5, 6).

2.6.2. Аналітична модель визначення адгезії середовища при нагнітанні

Системи для переміщення шару тіста між валками є важливими складовими формувальної машини, що забезпечують роль його транспортування до формуючих пристроїв. Обмежені допустимі навантаження тіста вимагають створення специфічних умов синтезу систем «валок–тісто», формуючих і напрямних елементів та ведучих валкових робочих органів за використання сил адгезії (вимірюється в Н) й тертя в ролі сил рушійних і сил опору. У зв'язку з цим в інтересах оптимізованого синтезу необхідною є інформація, яка стосується явищ і особливостей адгезії, можливостей її трансформації в кінематичних парах як у бік збільшення, так і в бік зменшення [13]. Різновиди тіста з його особливостями стосуються з іншими механічними параметрами і коефіцієнтів тертя. В основі взаємодій між валками і середовищем вбачається їх відповідність законам тертя Амонтона-Кулона, співвідношенням Ейлера, поняттям кут і конус тертя, радіус і круг тертя, приведений коефіцієнт тертя. В свою чергу формулювання цих понять і визначень стосується таких загальновизнаних припущень і понять механіки, як результуюча сил тяжіння, результуюча розподілених сил нормального тиску, результуюча сила адгезії, центр мас, геометричний центр поверхні контактування тощо. В технологіях розрахунків і визначень параметрів систем присутні закономірності статички і динаміки та принципи незалежності дії сил, адитивності, Лагранжа-Даламбера.

В пошуках розв'язання задач досліджень здійснювалося моделювання для оцінки зовнішніх впливів на реакції відгуки локальних зон систем на основі математичних формалізацій із постановкою обчислювальних експериментів. Запропоновано математичну модель сил адгезійного фактору впливу, який на відміну від коефіцієнта тертя виступає зі стабілізованим значенням. Важливо, що це стосується для забезпечення відсутності буксування при протягуванні тіста. Модифіковані теоретичні залежності дозволили здійснити розрахункові дворівневі експерименти для створення перспектив поглиблення можливостей генерування збільшених рушійних факторів.

Оскільки кут охоплення α виступає в ролі важливого варіативного фактора впливу, то на основі аналітичних розробок здійснено обчислювальний експеримент, в якому функцією відгуку прийнято значення вказаного кута.

Структура тіста призводить до необхідності врахування значень коефіцієнтів тертя. Прояви неізотропності відносно орієнтації структур мають

місце на рівнях молекулярної побудови у відгуках на значення коефіцієнтів тертя. Одержано відповідні рівняння регресій.

Очевидно, що в окремих випадках пошук геометричних зв'язків для забезпечення визначених кутів охоплення валком тіста може бути суттєво спрощеним, якщо вирішується початковий синтез технологічного обладнання. Разом з тим нестабільність значень адгезії і зовнішніх умов експлуатації систем валків, рівно як і варіації фізико-механічних параметрів тіста, призводять до необхідності пошуку нестандартних підходів для забезпечення заданих кінематичних параметрів їх переміщень. Ситуація, пов'язана з нагнітанням тіста з обмеженими параметрами міцності, ускладнюється значними початковими масами тіста, особливостями механізмів подачі і розкачування тощо.

Теорія фрикційних взаємодій тіста з опорними рухомими елементами системи створювалася на основі припущень про обмежений опір в деформаціях згину, стискання, кручення. Передавання руху тісту між обертовими валками забезпечується силами адгезії, тертя, що виникають між ними в результаті їх контакту. Сили адгезії, розподілені по дугах охоплення, в першу чергу залежать від дуг охоплення, попереднього затягування (натягу) і коефіцієнтів тертя.

Вивчення явищ адгезії тіста з валками умовно поділяємо на два випадки: тісто рухається по поверхні циліндричного валка, і коли повне відносне ковзання відсутнє. Обидва ці випадки мають місце в системах транспортування і використання вязких матеріалів, властивості яких щодо обмежених опорів деформацій згину, стискання і кручення.

Зупинимося більш детально на співвідношеннях між силовими параметрами системи «валок–тісто» рис. 2.23. Цей випадок відповідає системі для зміни напрямків в траєкторіях переміщення тіста або для створення і стабілізації опорів під час переміщень тазатігування (натягів) на окремих ділянках.

Приймаємо, що тісто на валку заданої кількості при транспортуванні не деформується, а його швидкість ковзання $V = \text{const}$. Масою цього тіста і його відцентровою силою нехтуємо. За необхідності подолання сили адгезії F_{ad} маємо:

$$s_2 = s_1 - F_{ad} \text{ і звідси}$$

$$F_{ad} = s_2 - s_1. \quad (2.42)$$

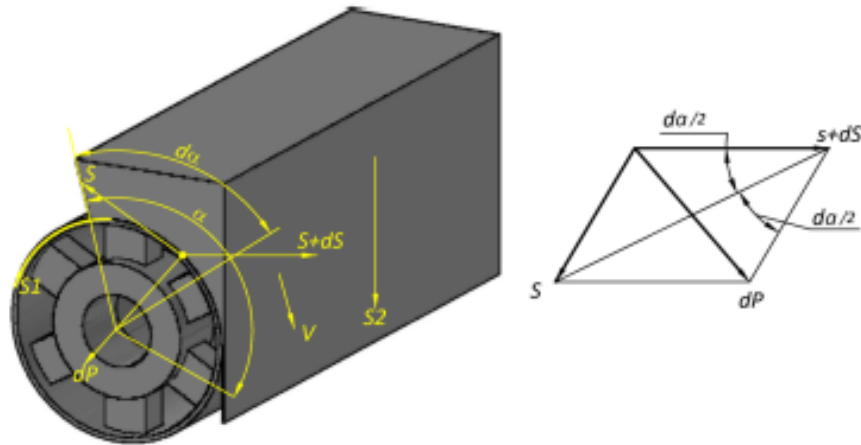


Рис. 2.23. Схема до визначення силових параметрів системи «валок – тісто»

На схемі $d\alpha$ і α відповідно елементарний і повний кути охоплення, s і $s + ds$ – затягування (натяг) тіста. Тоді елементарна сила адгезії F_{ad} дорівнюватиме:

$$dF_{ad} = (s+ds) - s = ds \text{ і } dF_{ad} = f dP, \quad (2.43)$$

де dP – елементарна сила притискання, яка визначається за відомих сил s та $s+ds$.

Якщо знехтувати величинами другого порядку і замінити паралелограм ромбом зі сторонами s , то

$$dP = 2s \sin d\alpha/2 = 2s d\alpha/2 = s d\alpha \quad (2.44)$$

Тоді з врахуванням рівнянь (2.43), маємо:

$$ds/s = f d\alpha. \quad (2.45)$$

Інтегруванням лівої і правої частин умови (2.45) в межах від s_1 до s_2 і, відповідно, від нуля до α , отримаємо:

$$\int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{s} = \int_0^{\alpha} f d\alpha \ln \frac{s_2}{s_1} = f \alpha. \quad (2.46)$$

Звідси

$$s_2 = s_1 e^{\alpha f} \quad (2.47)$$

Тоді з врахуванням умови (2.42), запишемо:

$$F_{ad} = s_1 (e^{\alpha f} - 1). \quad (2.48)$$

Сила F_{ad} є тією найбільшою силою, яка може бути передана.

Розподілена адгезії, що діє на тісто дорівнює різниці s_1 і s_2 , тобто:

$$F_{ad} = s_1 - s_2 = s_2 (e^{\alpha f} - 1). \quad (2.49)$$

Значення s_1 має співставлятися з допустимим навантаженням тіста з умови міцності на розтягування і при цьому:

$$[s_1] \leq [\sigma_0] f_0 [s] \quad (2.50)$$

де $[\sigma_0]$ – допустимі напруження $nscnf$, Па; f_0 – площа його поперечного перерізу, m^2 .

Умова передавання руху від валка до тіста визначається величиною кута охоплення $[\alpha]$

$$[\alpha] \geq \frac{\ln \frac{s_1}{s_2}}{f} \geq \frac{\ln \frac{[\sigma_0] f_0}{s_2}}{f}. \quad (2.51)$$

За умови дії валків сила адгезії частково зменшуються за рахунок дії відцентрових сил. За врахування останніх співвідношення між силовими параметрами набувають вид:

$$s_1 = F_{ad} \frac{e^{f\alpha}}{e^{f\alpha} - 1} + \frac{gv^2}{g} g \quad (2.52)$$

$$s_2 = \frac{1}{e^{f\alpha} - 1} + \frac{gv^2}{g} qv \quad (2.53)$$

$$F_{ad} = \left(s_1 - \frac{gv^2}{g}\right) \frac{e^{f\alpha} - 1}{e^{f\alpha}} \quad (2.54)$$

де v – колова швидкість, м/с;

q – погонна маса гнучкого елемента, кг/м;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Наведені теоретичні залежності у своїй сукупності дозволяють здійснити розрахункові дворівневі експерименти, які створять перспективи поглиблення можливостей передавання руху і в системах з фрикційними зв'язками із кількісними оцінками впливів різних факторів на вихідну величину. Важливість останнього пов'язана з необхідністю удосконалення і оптимізації систем, оскільки навіть за наявності математичної формалізації процесів або явищ в присутності кількох факторів впливів напрямок пошуку їх оптимальних співвідношень залишається невідомим. Оптимізація об'єктів стосується сукупності значень параметрів керування, які забезпечують досягнення екстремумів вихідної величини та порівняння значущості факторів впливу.

Наведений в роботі набір математичних формалізацій дозволяє виконати планування обчислювальних експериментів з числом факторів від двох до чотирьох з одержанням різних функцій відгуку, використовуючи табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Умови проведення експерименту

Величина	Фактори		
	S_1, H	α , рад	f
Основний рівень	X_1	X_2	X_3
Інтервал варіювання, H	$0.9S_{\max}=2250$	2617	0,3
Нижній рівень, H	$S_1-h_1=2000$	2.093	0.2
Верхній рівень, H	$S_1+h_1=2500$	3.14	0.4

Таблиця 2.2

Матриця планування трифакторного експерименту

Номер досліду	фактори				Функція відгуку
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	
1	+	-	-	-	3039
2	+	+	-	-	3799
3	+	+	+	-	3747
4	-	-	+	+	4684
5	-	-	-	+	4619
6	-	-	+	+	3774
7	+	+	-	-	7220
8	+	-	+	-	8777

Одержані математичні формули на рівні алгоритмів розрахунків в безпосередньому застосуванні або їх сполучень. В першому наближенні звернемося до формули (2.26), в якій функція відгуку представлена силою адгезії F_{ad} , а до числа факторів впливу віднесемо натяг s_1 тіста, кут охоплення α і коефіцієнт тертя $f_{тз}$. Орієнтиром при виборі значення s_1 має бути величина s_{1max} , яка визначається через площу поперечного перерізу тіста і допустиме напруження $[\sigma_0]$ в його навантаженні на розтягування і при цьому:

$$s_{1max} \leq [\sigma] b \delta \tag{2.55}$$

де b і δ – відповідно ширина і товщина тіста, м.

У зв'язку з тим, що відбувається дворівневий експеримент, кожен з факторів набуває два значення: верхній $X_{iв}$ і нижній $X_{iн}$ рівні. Оскільки планування і опрацювання експериментів виконується не з фізичними, а з кодованими величинами, то визначимо кодовані зміни x_i :

$$x_i = \frac{X_i - X_i^0}{h_i} \tag{2.56}$$

де X_i^0 – основний рівень фактора;

h_i – інтервал його варіювання.

Якщо факторний простір обмежений верхньою $X_{iВ}$ і нижньою $X_{iН}$ межами, то інтервалом називається половина діапазону, в якому змінюється фактор:

$$h_i = \frac{1}{2}(X_{iВ} - X_{iН}), \quad (2.57)$$

а основний рівень фактора:

$$X_i^0 = \frac{1}{2}(X_{iВ} + X_{iН}). \quad (2.58)$$

За дворівневого експерименту кожен фактор варіює в двох рівнях $X_{iВ}$ і $X_{iН}$, тому кодовані значення x_i матимуть тільки два значення: -1 і $+1$.

У відповідності до умови (14) прийємо $S_{iВ} = S_{1max}$ і $S_{iН} = 0,8S_{1max}$. Тоді

$$s_i^0 = \frac{1}{2}(s_{1max} + 0,8s_{1max}) = 0,9s_{1max}, \quad (2.59)$$

а інтервал варіювання становить:

$$h_i = \frac{1}{2}(s_{1max} - 0,8s_{1max}) = 0,1s_{1max}. \quad (2.60)$$

Відповідно прийємо θ

$$\begin{aligned} \alpha_i^0 &= 150^\circ = 2,617 \text{ рад.} \\ \alpha_{В} &= \alpha_i^0 + 30^\circ = 180^\circ = 3,14 \text{ рад;} \\ \alpha_{Н} &= \alpha_i^0 - 30^\circ = 120^\circ = 2,093 \text{ рад;} \end{aligned} \quad (2.61)$$

Основний рівень фактора коефіцієнта тертя прийємо $f = 0,3$, інтервал варіювання $f_\alpha^0 = 0,1$. Тоді $f_{В} = 0,4$ і $f_{Н} = 0,2$. Результати кодування факторів занесені у таблицю 1.

Матриця планування трифакторного експерименту представлена в табл. 2. Столпчик X_0 потрібен для обчислення коефіцієнта b_0 . Для три факторного експерименту рівняння регресії має вісім невідомих і відповідно матриця планування має вісім дослідів N .

Матриця планування у табл. 2 доповнена стовпчиком, в який заносяться результати розрахунків функції відгуку. Для визначення величин s_{lmax} звернемося до величини допустимих значень напружень тіста. Для дріжджового тіста для бубликів допустиме напруження на розтягування становить 40...50 МПа. Товщину тіста приймемо $\delta = 0.125$ м, а ширину $b = 0,5$ м. Тоді площа поперечного перерізу півки становить $A = 0.0625\text{м}^2$ і за допустимого напруження на розтягування $[\sigma]_p$ 40 МПа.

Наступний крок пов'язаний з визначенням коефіцієнтів, що входять до рівняння регресії. Обробку експериментального масиву даних провели з використанням пакету прикладної програми «Statistica-12» для комп'ютера. Коефіцієнти рівняння регресії або апроксимуючої функції, за умови ортогональності та симетрії план-матриці планованого факторного експерименту, визначали згідно з стандартною методикою за відомими залежностями. Рівняння регресії має вид:

$$y = -5095.9 + 0.29X_1 + 2632.05X_2 + 9130.19X_3.$$

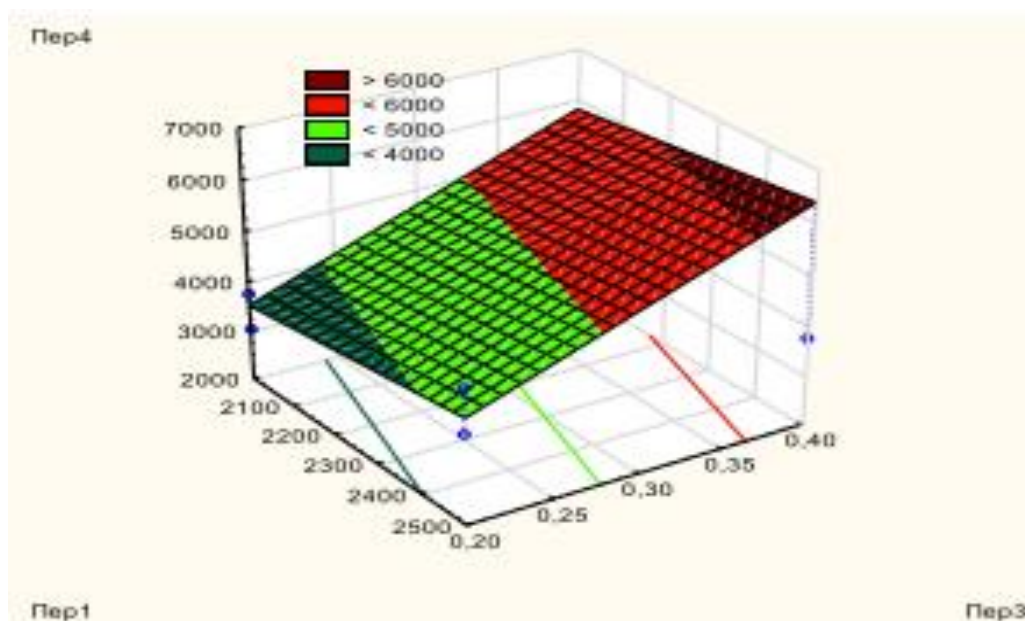
При рівні вірогідності $p = 0,95$ та значення t-альфа критерію рівному 2,365, отримали такі статистичні дані (рис. 3.15): коефіцієнт множинної детермінації $D = 0,842$;

коефіцієнт множинної кореляції $R = 0,917$;

стандартне відхилення оцінки $s = 0,802$;

F – критерій Фішера дорівнює 7,087.

Коефіцієнт D значимий з рівнем вірогідності $P = 0,92863$.



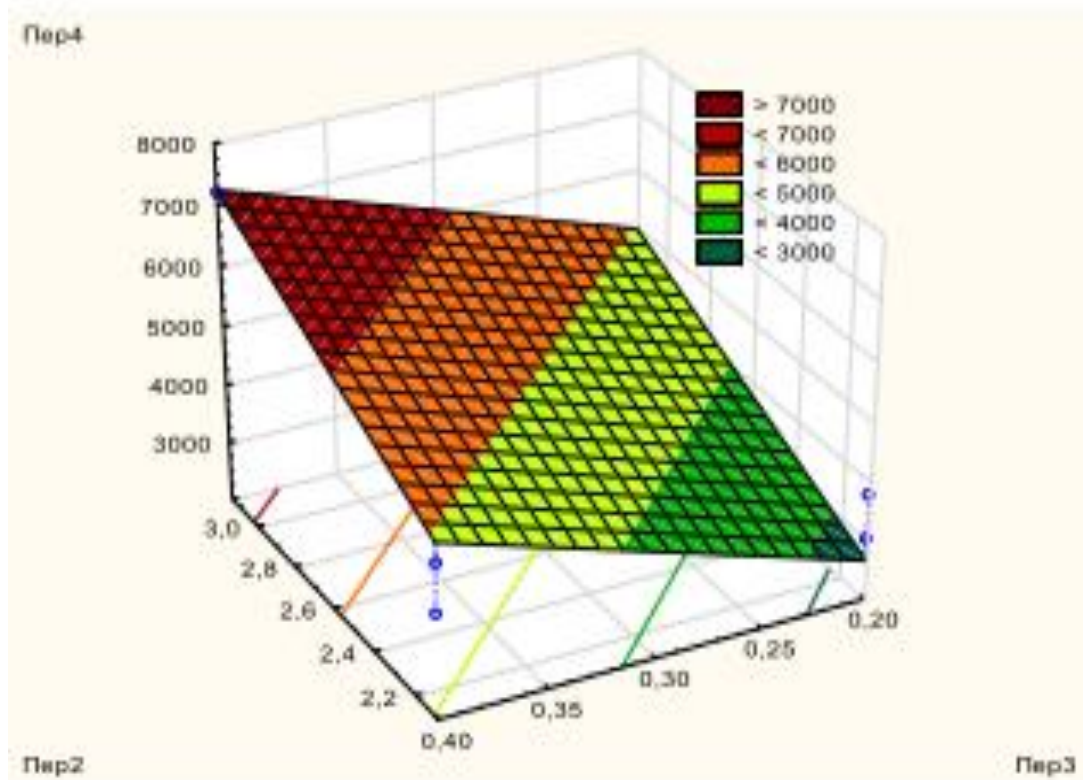


Рис. 2.25. Графіки відгуку залежностей: а) у від x_1 і x_2 ; б) у від x_2 і x_3

Графічне зображення зміни адгезійної сили тіста згідно експериментальних даних (рис. 2.25), тобто поверхня відгуку функціональної зміни сили адгезії тіста як функціонал.

З нього витікає, що всі фактори впливу є важливими з точки зору інтересів підвищення затягування тіста (натягу) в контактній площині, оскільки рушійним фактором при цьому є сила адгезії (умова (2.40)).

Сучасна теоретична база синтезу технологічних машин на основі взаємодії робочих органів з середовищем поєднує можливості врахування технологічних, економічних вимог, показників високої продуктивності, енергетичних заощаджень, обмежень динамічних навантажень тощо.

Досягнення поєднання вказаних вимог в значній мірі пов'язано з використанням адгезійних зв'язків безпосередньо як між робочими органами технологічних машин, так і в лініях виготовлення продукції. В системах переміщень в'язкого середовища (тіста) переважає застосування фрикційних робочих органів. Енергетичні витрати в системах переміщень тіста пов'язані з роботою рушійних сил проти адгезії й тертя та на створення потоків кінетичної енергії рухомих мас. На основі аналізу особливостей побудови формувальних машин запропоновано математичні формалізації перехідних

процесів адгезійних зв'язків з досягненням впливових режимів, що складаються з двох ефектів на основі незбігання етапів розгону робочих органів і у зв'язку з передаванням силам інерції ролі рушійних сил.

Висновки. Сучасна теоретична база синтезу технологічних машин на основі взаємодії робочих органів з середовищем поєднує можливості врахування технологічних, економічних вимог, показників високої продуктивності, енергетичних заощаджень, обмежень динамічних навантажень тощо. Досягнення поєднання вказаних вимог в значній мірі пов'язано з використанням адгезійних зв'язків безпосередньо як між робочими органами технологічних машин, так і в лініях виготовлення продукції. В системах переміщень в'язкого середовища (тіста) переважає застосування фрикційних робочих органів. Енергетичні витрати в системах переміщень тіста пов'язані з роботою рушійних сил проти адгезії й тертя та на створення потоків кінетичної енергії рухомих мас. На основі аналізу особливостей побудови формувальних машин запропоновано математичні формалізації перехідних процесів адгезійних зв'язків з досягненням впливових режимів, що складаються з двох ефектів на основі незбігання етапів розгону робочих органів і у зв'язку з передаванням силам інерції ролі рушійних сил.

2.7. Методи дослідження

Для дослідження і контролю структурно-механічних властивостей, визначення їх кількісних характеристик найбільш доцільно використовувати реологічні методи. При їх оцінюванні найбільш повно дає можливість дослідити залежність реологічних характеристик тіста від вмісту газової фази метод капілярної віскозиметрії. Такі дослідження проводились в роботах [2, 8] при використанні розроблених експериментальних установок (рис. 2.14, 2.15). Їх використання дає змогу провести широкий спектр досліджень кінетичних факторів: середньої швидкості потоку, об'ємну, масову витрату; динамічних: реологічні властивості тіста, зміна густини тіста, її залежність від вмісту вуглекислого газу. Вплив геометрії формувального каналу (досліджували використовуючи матриці) з різним кутом входу, довжини. В установці рис. 2.26 можна створювати різні значення допустимого тиску, але при цьому відсутні деформаційні впливи робочих органів. Тому в дослідження перед завантаженням тіста в циліндричний корпус 1, тісто додатково піддавалося деформації.

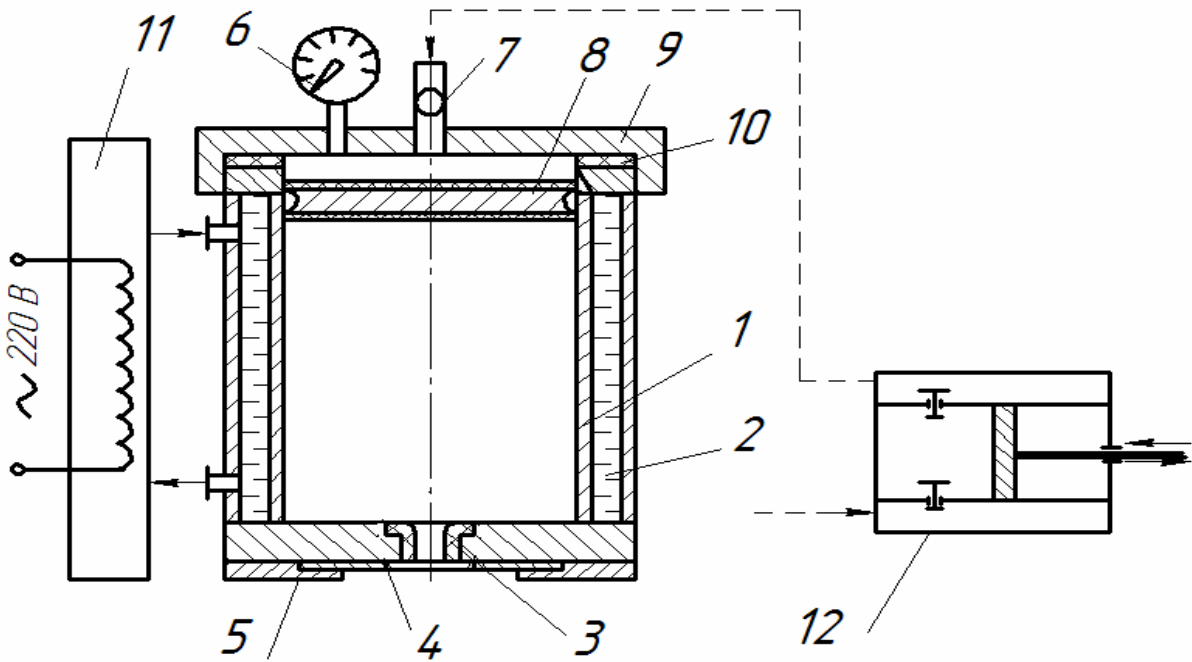


Рис. 2.26. Схема установки для дослідження реологічних характеристик дріжджового тіста та процесу нагнітання: 1 – корпус циліндричний; 2 – водяна сорочка; 3 – матриця; 4 – ніж; 5 – напрямна; 6 – манометр; 7 – запірний клапан; 8 – поршень; 9 – кришка; 10 – ущільнювач; 11 – ультратермостат; 12 – компресор

До найбільш важливих якісних показників готових бубличних виробів відносяться їх об'єм та стан пористості, які тісно корелюють між собою і характеризують ефективність технологічного процесу нагнітання.

Пристрій для випробовування тіста на розтяг призначений для визначення структурно-механічних властивостей тіста, тобто дозволяє оцінити розтяжність, міцність, схильність до пружних і пластичних деформацій.

Пристрій (рис. 2.27) містить нерухомий і рухомі захоплювачі для випробовуваного зразку, кожний з яких виконаний у вигляді пружинних затисків 1, 2. Рухомі захоплювачі закріплені на металевій рамі 3, встановленій на підставі 4 за допомогою роликів, що крутяться, 5. Пристосування для визначення величини переміщення виконано у вигляді шкали з розподілами 6. Випробовуваний зразок підтримується за допомогою послідовно закріплених на основі приладу роликів 7. Навантажувальний механізм складається із стійки 8, на якій закріплені напрямні кронштейни 9 для натягнення нитки 10 вантажем 11, що сполучені з рухомим захоплювачем.

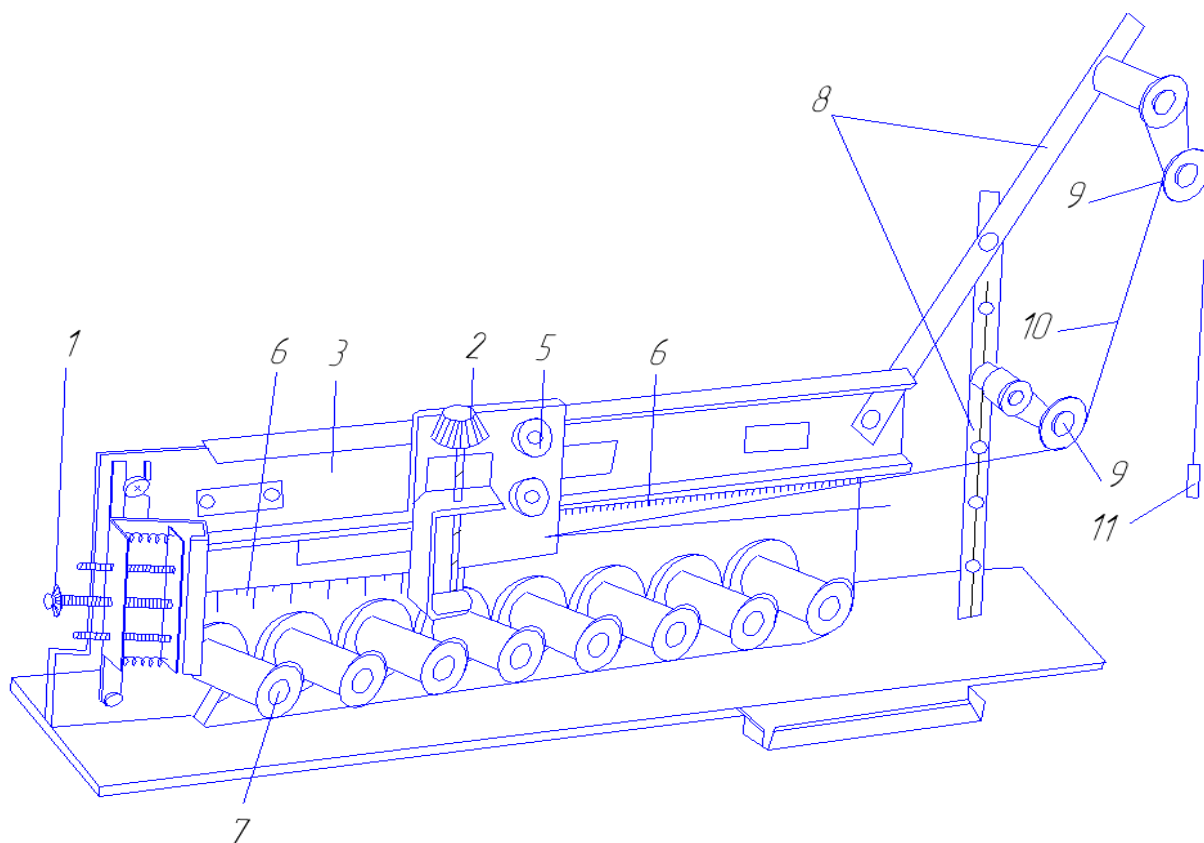
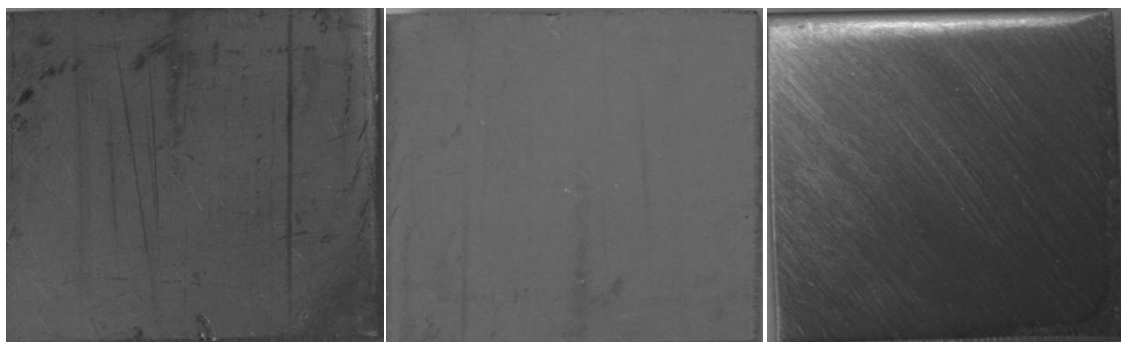


Рис. 2.27. Пристрій для випробовування тіста:

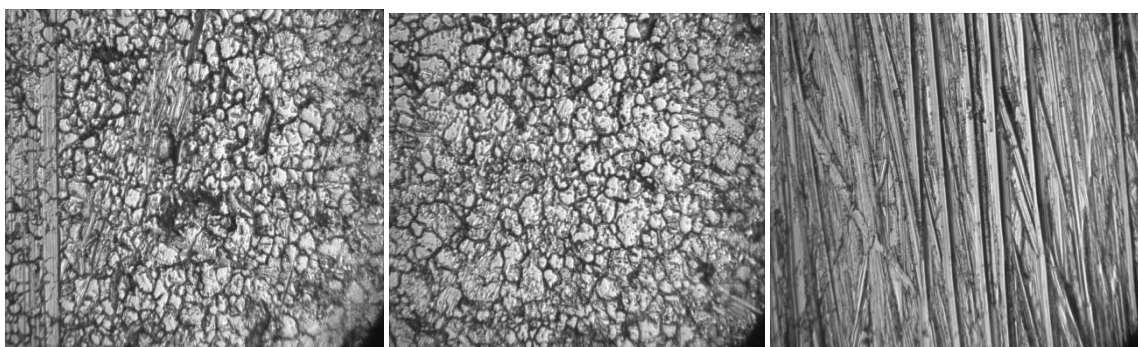
1,2 – пружинні затиски, 3 – металева рама,
 4 – підстава, 5 – ролик, 6 – шкала, 7 – підтримуючі ролики,
 8 – стійка, 9 – напрямні кронштейни, 10 – нитка, 11 – вантаж

2.7.1. Методи досліджень шорсткості поверхні

Експериментальні дослідження проводили з використанням сучасних стандартних і загальноприйнятих методів технічні (визначення шорсткості поверхні сталі), мікроскопічні (світлова та електронна мікроскопія процесу утворення і деградації залишків тіста), спектрофотометричні (оптична густина (щільність), математичного та теоретичного моделювання, статистичні. Для дослідження були використані пластинки з нержавіючої корозійно-стійкої нікель-хромової аустенітної сталі розміром 30×30 мм та товщиною 5 мм, з шорсткістю поверхні $R_a=2,687\pm 0,014$ мкм, $R_a=0,95\pm 0,092$ мкм, які зображені на рис. 2. Їх шорсткість відповідала поверхні валка (рис. 2.28).



а


 $R_a = (2,68 \pm 0,014) \text{ мкм}$ $R_a = (0,95 \pm 0,092) \text{ мкм}$ $R_a = (0,63 \pm 0,087) \text{ мкм}$

б

Рис. 2.28. Вигляд пластинок з нержавіючої з різною шорсткістю:

А – нативний вигляд пластин; б – вигляд пластин з допомогою мікроінтерферометра МІІ-4У4.2(збільшення 1500 раз)

Шорсткість поверхонь пластин нержавіючої сталі визначали за допомогою профілометра марки 296. До складу профілографа (рис. 2.28) входять: стійка 3 для встановлення деталей датчик з алмазною вимірювальною голкою, привод 1 для переміщення датчика вздовж вимірюваної поверхні та електронний блок 2, для керування та обчислення шорсткості поверхонь. Вимірювана деталь встановлюється на плиті стійки 3. Якщо деталь має циліндричну форму, то на плиту стійки встановлюється призма 5, а вимірювана деталь встановлюється на призмі 5. Деталь встановлюють таким чином, щоб вимірювана поверхня була перпендикулярна площині вимірювання. Гайка 6 призначена для переміщення датчика 4 з приводом 1 по направляючій стійки 3 та встановлення алмазної голки датчика 4 на вимірювану поверхню деталі.

Блок електронний 2 виконаний в настільному варіанті. На лицьовій панелі блоку розташовані: цифрове табло для відліку вимірюваного значення R_a ; індикатор робочої зони; кнопка включення мережі.



Рис. 2.29. Профілометр марки 296

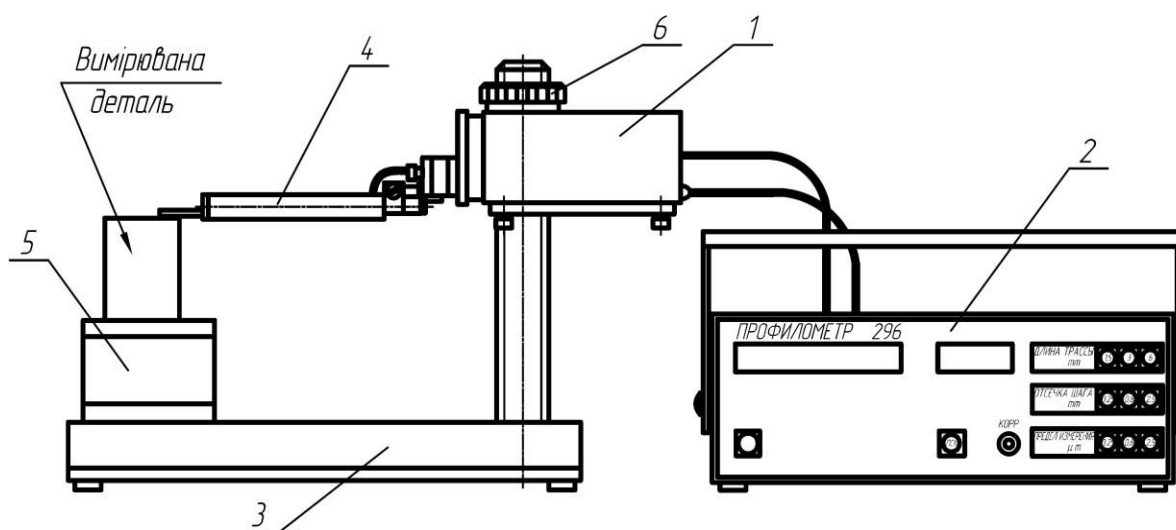


Рис. 2.30. Загальний вигляд профілометра мод. 296: привод – 1; блок електронний – 2; стійка – 3; датчик – 4; призма – 5; гайка – 6

2.7.2. Визначення параметрів напружено-деформованого тіста

Граничні умови, що відповідають умовам механічного навантаження тіста в процесі нагнітання та кінематики взаємодії системи валки – тісто:

1. На поверхні механічного навантаження тіста задається рівномірно розподілений тиск.

2. На контактних поверхнях задаються кінематичні обмеження у напрямку нормалі до відповідних поверхонь.

3. На цих же поверхнях діють сили тертя у напрямку, протилежному до напрямку руху.

4. Поверхня валка після нагнітання -вільна.

Надалі вважаємо, що подані крайові умови забезпечують одиничність рішення рівнянь.

Специфічною особливістю напружено-деформованого стану тіста є урахування і дослідження впливу на процес сил тертя, що, в свою чергу, визначаються нормальними напруженнями σ_N і коефіцієнтом тертя μ . Зокрема на рис. 2.31 подано вплив коефіцієнта тертя на дотичні напруження τ в тісті у пристінній області: при припущенні існування повністю прилиплоного шару ($\mu=1$), після урахування сил тертя ($\mu=0,68$), а також за умови вільного ковзання ($\mu=0,6$).

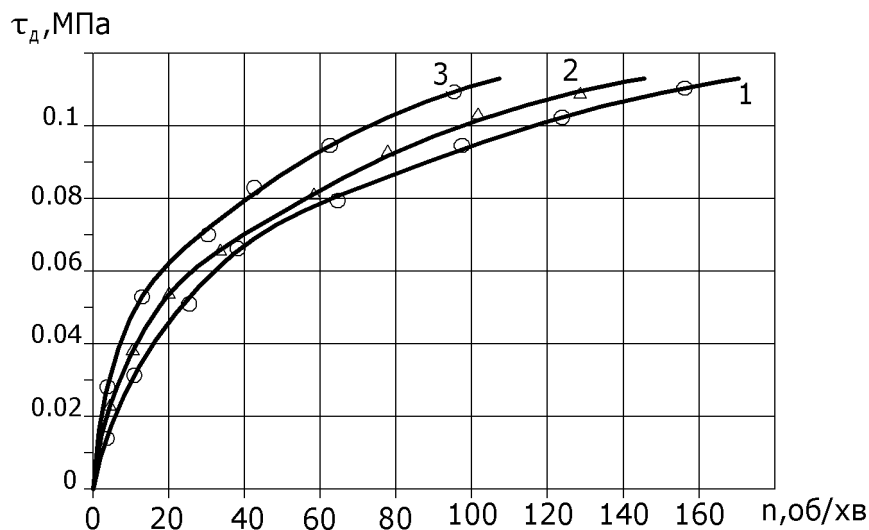


Рис. 2.31. Залежність дотичного напруження на боковій поверхні формівного каналу від частоти обертання валка при коефіцієнті тертя μ : 1 – 0; 2 – 0.68; 3 – 1

З графічної залежності видно, що збільшення коефіцієнту тертя призводить до збільшення дотичних напружень в пристінних елементах. Спостерігається незначна зміна коефіцієнта тертя за різних значень частоти обертання валка в границях 80–100 об/хв., що пояснюється величиною дотичних напружень. Наслідком цього є погіршення органолептичних показників готової продукції – розриви поверхні заготовок, нерівномірна пористість. Тому для поліпшення якості виробів і забезпечення цілості їх

поверхні, сили тертя треба зменшувати за рахунок точності обробки поверхні вузла нагнітання формувальної машини та зменшення частоти обертання валка до $0,2\text{с}^{-1}$. Це підтверджується даними роботи [8], де розкрито вплив тертя на процес тістоутворення.

Вплив коефіцієнта тертя, що залежить від ряду чинників, згаданих вище, суттєво впливає на швидкість перемішування маси тіста, що підлягає розкачуванню.

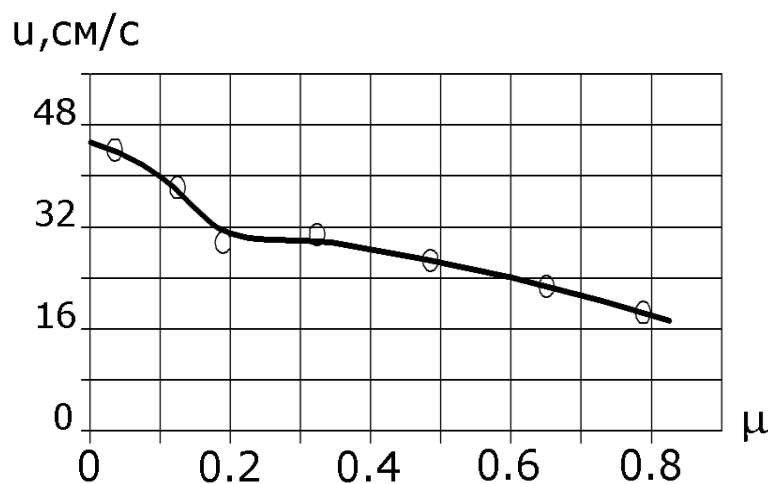


Рис. 2.32. Вплив коефіцієнта тертя на швидкість переміщення тістової маси u

При малих коефіцієнтах тертя (рис. 2.32) від 0.2 до 0.4 спостерігається рівномірне переміщення тістової маси із швидкістю 30см/с , а при суттєвому збільшенні коефіцієнта тертя від 0.5 до 0.9 призводить до помітного зниження швидкості переміщення (відповідно від 24 до 16 см/с). Дільниця з великими швидкостями наявна на стадії затягування. За таких умов коефіцієнт тертя плавно впливає на переміщення, а при значенні $0.2\text{--}0.4$ швидкість руху становить 32 см/с . Отже, до особливостей визначення впливу коефіцієнта тертя належить і те, що на основі порівнянь даних фізичних експериментів і результатів відповідних їм чисельних обчислень можна запропонувати методику визначення коефіцієнтів тертя для різних умов взаємодії пари «продукт – робоча камера». Порівнюючи відповідні результати, можна розв’язати так звану «зворотну» задачу, тобто визначити коефіцієнт μ , а також оцінити ефективність і доцільність використання певного матеріалу для конструювання обладнання.

Залежності гідростатичного тиску P і нормального напруження σ в формівному каналі між обертовими валками подані на рис. 2.33. Вони дозволяють оцінити вплив розміщення поверхні валків, що впливає на умови, в

яких відбувається процес розкатування тіста, що в свою чергу дозволяє визначити оптимальне значення такого зазору.

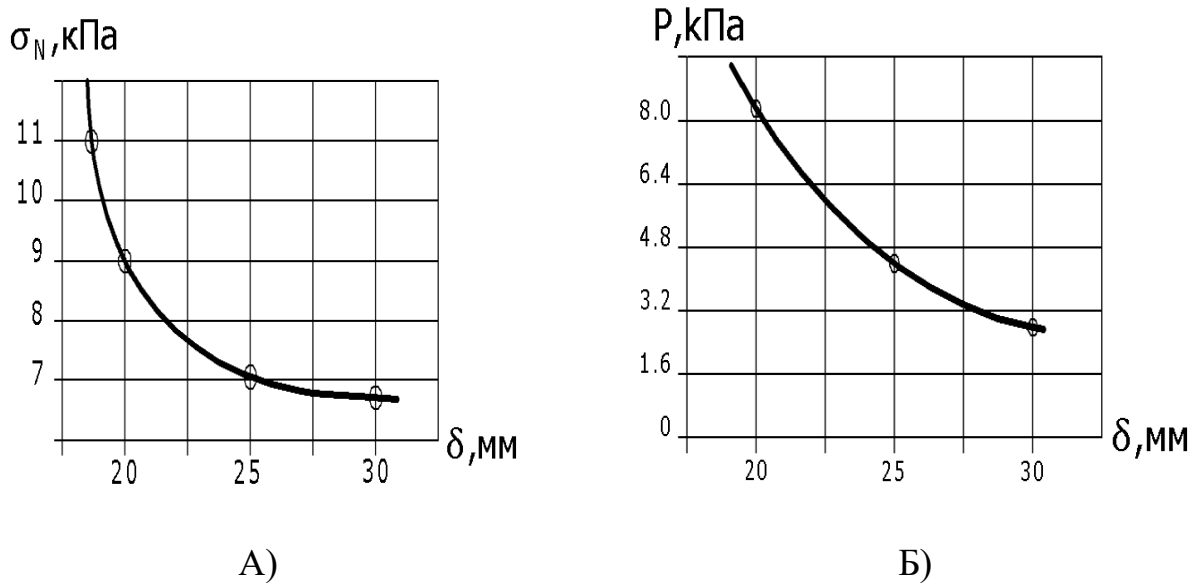


Рис. 2.33. А) – залежність нормального напруження від зазору;
 Б) – залежність гідростатичного тиску від зазору

Помітно, що при значеннях зазору $\delta < 15$ мм виникають значні нормальні напруження та зростання гідростатичного тиску понад 8 кПа, що викликає в свою чергу велике навантаження на привід машини. Отримані дані дозволили вибрати оптимальні режими роботи і показали, що при зазору $d=20$ мм вплив на гомогенне середовище найбільший.

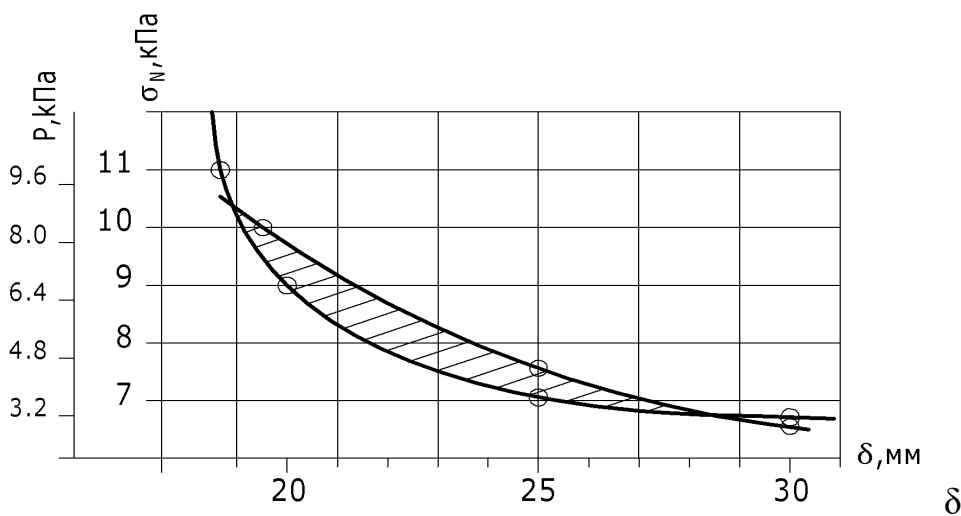


Рис. 2.34. Визначення зони оптимальних значень зазору

За умов порівняння двох графіків рис. 2.33 а і рис.2.33 б можна визначити зону оптимальних значень зазору між валками (рис. 2.34). Таким чином оптимальне значення зазору буде 18..30 мм. При таких значеннях настають сприятливі умови для дотримання стабільності процесу. Це в свою чергу дозволяє регулювати тривалість, якість структури тіста при оптимальних значеннях обертання валків.

Маючи дотичні та нормальні напруження на поверхні валків, можна отримати залежності необхідних моментів обертання $\left(M = \int_A \tau_D \cdot R \cdot dA \right)$, а маючи залежності моментів та значення необхідної частоти обертання валка, можна отримати залежності необхідних потужностей $\left(N = \frac{\pi \cdot M \cdot n}{30} \right)$.

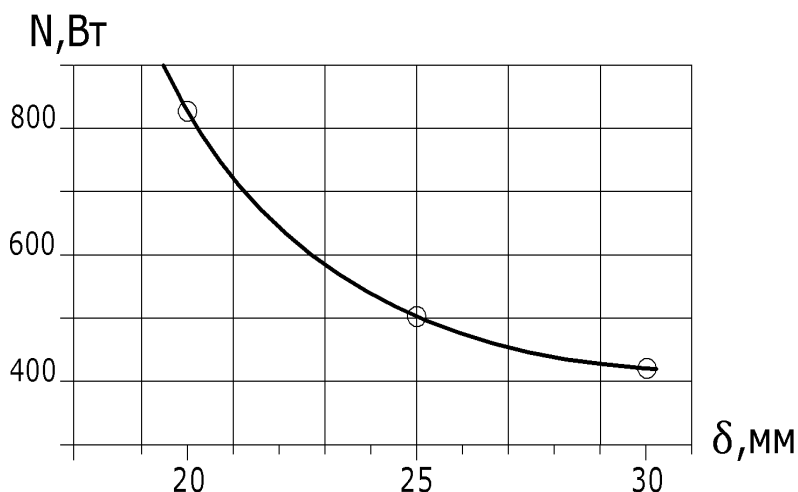


Рис. 2.35. Залежність потужності на валку від величини зазору

Отримана графічна залежність потужності від значення зазору між обертовими валками рис. 2.35 показує, що найменша кількість споживання потужності ймовірна при зазорах 25÷30 мм. Цим пояснюється те, що у вузлі нагнітання дотичні та нормальні напруження, гідростатичний тиск наявні з оптимальними значеннями. За таких умов процесу, потужність становитиме 510÷420 Вт, що дозволяє встановити графік зміни потужності за весь цикл процесу (рис 2.36).

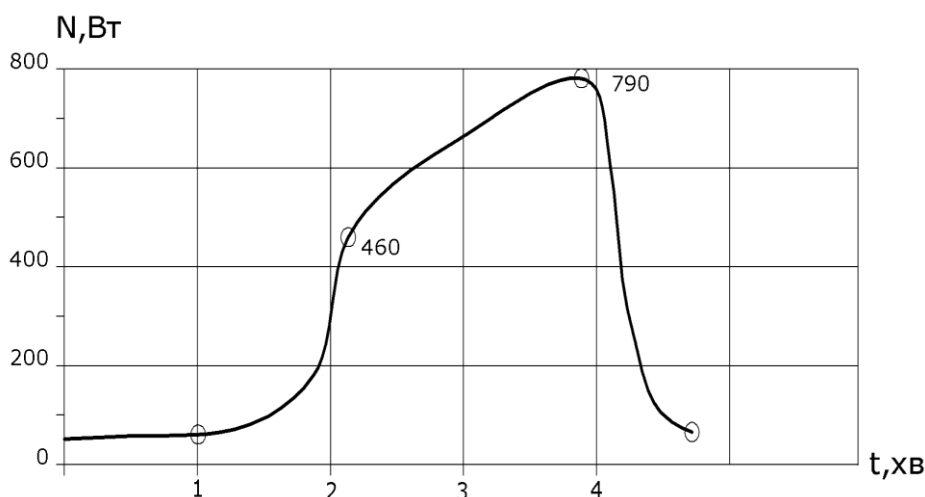


Рис. 2.36. Повний робочий цикл машини. Зміна потужності на валі машини протягом процесу

З графіка залежності чітко видно, що найбільшій потужності на валу потребує етап розкачування тіста. Тут миттєва потужність на валі машини 460..790 Вт.

Висновки до другого розділу

Розглянуто геологію дисперсних систем і математичне моделювання процесу деформування тіста, яке побудоване на рівняннях збереження руху тіста, що враховує аномалію в'язкості. На основі аналізу механічного впливу валків, а також урахування контактної взаємодії з тістом, розглянуто його деформування в умовах силового навантаження. Математичне моделювання даного процесу є інструментом, що дає можливість з мінімальними витратами часу і матеріальних ресурсів розрахувати конструктивні варіанти вузла нагнітання, досліджувати поведінку тіста з найрізноманітнішими структурно-механічними характеристиками.

Розглянуто можливі варіанти апаратурного оформлення процесу. Вказано на необхідність додаткових досліджень з метою кращого пристосування до умов проведення процесів, а також розроблення та застосування нових методик у вигляді програмного забезпечення із використанням концепції моделювання процесів тривимірного руху рідин, а також візуалізації цих процесів методом комп'ютерної графіки.

Для розрахунків було застосовано модель течії з вільною поверхнею і масопереносу змішуваних компонентів. Рівняння руху в'язкого тіста в просторі між двома валками покладене в основу визначення адгезії, виходячи із будови

машини. Одержана математична модель визначення адгезії дозволяє встановити сили, які діють на валки та потужність, необхідну для протікання процесу. На основі аналізу всієї сукупності даних, з'ясовано основні складові зусилля, що впливають на збільшення потужності приводу валків.

Встановлено, що процес нагнітання тіста відбувається при сприянні адгезії, що безпосередньо впливає на нього. Моделювання умов утворення адгезійних сил, які відбуваються в робочій камері машини з урахуванням як виду і стану поверхні, так і структурно-механічних властивостей тіста дає можливість вимірювати і керувати силами адгезії для правильного одержання режимів.

Список використаної літератури

1. Воларович М. П., Гуткин А. М. К вопросу о течении вязко-пластичных дисперсных систем в зазоре между двумя соосными трубами. «Коллоидный журнал». 1963. Т. XX. № 6.
2. Сандул О. О., Штефан Є. В., Теличкун Ю. С., Теличкун В. І. Математичне моделювання процесу формування тіста екструзією. Харчова промисловість. 2001. Вип. 46. С. 95–98.
3. Гортинский В. В., Гуськов К. П., Панфилов В. А., Мачихин В. А. Исследование процесса нагнетания бараночного теста валками. Хлебопекарная и кондитерская промышленность. 1967. № 8.
4. Зайцев А. В., Пеленко Ф. В. Моделирование течения вязкой жидкости в трубе. Электронный научный журнал «Процессы и аппараты пищевых производств». Электронный журнал. 2012. № 1.
5. Wu Souheng. Polymer Interface and Adhesion. New York and Bael: Marcel Dekker. Inc. 1973. P. 19–17.
6. Мачихин Ю. А., Мачихин С. А. Инженерная реология пищевых материалов. М: Легкая и пищевая пром-сть, 1991. 216 с.
7. Стадник І. Я., Лісовенко О. Т. Процеси та машини для замішування тіста. Тернопіль: видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. С. 21–27.
8. Стадник І. Я. Науково-технічні основи процесів та розробка обладнання для безлопатевого замішування тіста: автореф. дис. ...докт. техн. наук: спец. 05.18.12 «Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв», НУХТ. К., 2014. 40 с.
9. Доломакін Ю. Ю. «Наукове обґрунтування параметрів періодичного змішування водно-борошняних сумішей та створення високоефективного обладнання» дисертація к.т.н. Київ: 2017 р.

10. Стадник І. Я. «Обґрунтування параметрів, що відбуваються в робочих камерах тістоділильних машин». *Хранение и переработка зерна*. № 5. 2013. С. 57–59.
11. Андреев А. Н. Расчет энергосиловых параметров процесса раскатки теста на валковой машине. *Вопросы торгово-технологического оборудования: внутривуз. Сб. науч. тр.* Л.: ЛИСТ, 1975. Вып. 50. С. 4–7.
12. Нркебаев М. Ж. Силовое взаимодействие между обрабатываемыми материалами и валками в области деформации. *Легкая и пищевая промышленность*. Алматы. 1995. № 3.
13. Кафаров В. В., Дорохов И. Н. Системный анализ процессов химической технологии. *Основы стратегии*. М.: Наука, 1976. 300 с.
14. Урьев Н. Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. М.: Химия, 1988. 256 с.
15. Зимон А. Д. Адгезия жидкости и смачивание. М.: Химия, 1974. С. 7.
16. Дерягин Б. В. Кротова Н. А., Смилга В. П. Адгезия твердых тел. М.: Наука, 1973. 279 с.
17. Добротвор І. Г., Стадник І. Я. Дослідження розподілу концентрацій розчинних шарів при змішуванні. *Хранение и переработка зерна*. 2011. № 8. С. 48–50.
18. Козьмина Н. В. Биохимия хлебопечения. М.: Пищевая промышленность, 1978. 280 с.
19. Соколенко А. І., Шевченко О. Ю., Піддубний В. А. Інтенсифікація масообмінних процесів в харчових технологіях. К.: Люксар, 2008. 443 с.
20. Бельний В. А., Егоренков Н. Н., Плескачевский Ю. М. Адгезия полимеров к металлам. Минск: Наука и техника, 1971. 286 с.
21. Берлик А. А., Басик В. Е. Основни адгезии полимеров. М.: Химия, 1969. 319 с.
22. Дерягин Б. В. Что такое трения? М.: Изд-во АН СССР, 1963. 231 с.
23. Теория трения и износа: сб статей. Н.:Наука, 1965. 365 с.
24. Ли Л.-Х. II Адгезив и адгезионные соединения / пер. с англ. М.: Мир, 1979. С. 360.
25. Берлин А. А., Басик В.Е. Основы адгезии полимеров. М.: Химия, 1974. С. 6.
26. Вакула В. Л., Притинин Л. М. Физическая химия адгезии полимеров. М.: Химия, 1984. С. 12.
27. Wake W. C. *Adhesion and Formulamion of Adhesives*. London: Applied Seince Publishers, 1982. P. 3.

28. Pawel Drozdziel, Andrij Derkach, Igor Stadnyk, Tatiana Vitenko Simulation of components mixing in order to determine rational parameters of working bodies. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2016. Vol. 9. P. 130–138.
29. Stadnyk I., Dobrotvor I., Katarzyna S. Determination of power output and impact on the rheological parameters of raw materials during rolling. *Agricultural Engineering*. 2016. Vol. 20. DE GRUYTER. 5–12 p.
30. Stadnyk I., Piddubnyi V., Karpyk H., Kravchenko M., Hidzhelitskyi V. Adhesion effect on environment process injection. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. Vol. 13. 2019. No. 1. P. 429–437. URL: <https://doi.org/10.5219/1078>.

РОЗДІЛ 3

ОЦІНКА ЗОВНІШНІХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВПЛИВІВ ТА ТРАНСФОРМАЦІЯ СИРОВИННИХ ПОТОКІВ

3.1. Обґрунтування основних енергетичних впливів на параметри потоку середовища

Машина з валковими робочими органами – це транспортні системи, які десятки років використовуються на підприємствах народного господарства. Прогнозування можливості виникнення різних непередбачуваних ситуацій в робочій камері машини із-за дії робочого органу на середовище є актуальним, оскільки значна їх частина експлуатується понад п'ятдесят років. Сучасні методи діагностики дії робочих органів за допомогою математичного моделювання і комп'ютерних програм дозволяють з високою точністю визначити розміри та місце знаходження критичних ситуацій при різних навантаженнях робочого органу і оброблюваного середовища. Навантаження необхідно знати при прогнозуванні можливих перенавантаженнях машини, при моделюванні течії середовища та його зміни структурно-механічних властивостей в місцях робочої камери у процесах змішування й формування виробу. При цьому процес змішування і формування повинен розглядатися як одне ціле. Взаємодія конструктивних факторів з технологічними призводить до зміни середовища навіть за умов додержання всіх режимів роботи машини при її експлуатації. Тому їх встановлення та прогнозування є одними з найбільш небезпечних явищ, що призводить до неякісного змішування і формування виробу. І тому дуже важливим є їх попередження та розробка можливих напрямків удосконалення процесу і машини [1, 2].

Крім цього, значний термін експлуатації призводить до старіння матеріалу робочого органу, появи корозійних явищ, що є причиною утворення дефектів різних форм і розмірів на їх поверхні. Допущення дефектів спричиняють виникнення ситуацій, що неякісно вплинуть на процес. Першочерговість та значення досліджень в області забезпечення якості процесу при експлуатації формувальних машин підкреслюється в багатьох працях науковців [2]. Тому загальний прогноз ризику неякісної роботи – це процес їх виявлення і оцінка неякісного формування виробу та готової продукції в цілому.

3.1.1. Встановлення впливу конструктивних параметрів на середовище шляхом прогнозування об'єму можливої його течії

Вихідними даними для реалізації поставленої мети є: деформація середовища при проходженні процесу.

Фактори, які впливають на процес:

- прогнозована витрата середовища через наявні формувальні отвори між робочими органами;
- площа дії обочого органу;
- реологія середовища.

Фактор, який впливає на технологічний процес: - тиск в місці нагнітання, частота обертання.

Неякісне формування за органолептичним станом можна прогнозувати як вплив структурно-механічних властивостей середовища, а за причинами утворення – на технологічно-експлуатаційні фактори.

Враховуючи, що значна частина інформації, необхідної для управління формувальним процесом, із використання комп'ютерних програм дозволяє вирішити значну кількість питань – де це знаходиться і як проходить розподіл деформації? Це дозволяє з'ясування того, що знаходиться в робочій камері за назвою машини, за геометрією робочого органу і робочої камери. Виділення окремого вузла та процесу у даній машині при виявленні або пошуку цього місця, де знаходиться дія деформації або характеристики процесу, що задовольняють деякі умови.

Виникнення експлуатаційних неякісних формувань пов'язане з технічною недосконалістю конструктивних факторів машини. Структурно-механічні властивості середовища виникають внаслідок порушення правил технічної експлуатації машини, змін рецептури, температурних режимів і навколишнього середовища. При цьому площа формувального середовища S , яка утворюється між валками при постійному нагнітанні, визначається в залежності від його кількості і якості в робочій камері машини [3]. Точно розрахована величина витікань дасть можливість з більшою вірогідністю одержати інформацію про площу сформованого середовища.

Для прогнозування очікуваного витоку середовища використаємо відому залежність з гідромеханіки:

$$Q = \mu S \sqrt{2gH} \quad (3.1)$$

де Q – витрата;

μ – коефіцієнт витрати;
 S – площа отвору;
 g – прискорення вільного падіння;
 H – напір вточці зтягування середовища.

У літературних джерелах приведені залежності для визначення коефіцієнта витрати для отворів різної форми. При цьому застосування деяких із них для отворів неправильної форми вимагає визначення параметрів, які важко отримати за умов структурних змін, тому виникає необхідність удосконалення цих залежностей. Виникає питання, як впливають найбільші поперечні та поздовжні розміри отворів на значення коефіцієнта витрати?

Вплив в'язкості на коефіцієнт витрати, як правило, досліджується при ламінарному режимі течії. При турбулентному режимі в'язкість рідини на значення коефіцієнта витрати практично не впливає. Режим руху середовища у формувальних машинах, як правило, ламінарний в зоні зтягування і турбулентний гідравлічно нагнітання.

Із збільшенням числа Рейнольдса, тобто із зменшенням впливу сил в'язкості, коефіцієнт швидкості φ зростає внаслідок зменшення коефіцієнта опору ζ , а коефіцієнт стискування ε зменшується, що призводить до гальмування рідини біля кромки формувального отвору.

Коефіцієнт витрати μ , який визначається добутком φ на ε , із збільшенням числа Рейнольдса спочатку збільшується, що обумовлено стрімким зростанням φ , а потім, досягнувши максимального значення ($\mu_{\max} = 0,69$), зменшується внаслідок значного падіння ε і при більших значеннях числа Рейнольдса практично стабілізується [4].

Для опису розвиненого турбулентного руху ньютонівської рідини у шпаровому ущільненні між робочим органом та робочим органом й корпусом робочої камери в формувальній та змішувальній машинах можна використати основне рівняння Рейнольдса [5]:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vartheta + \frac{1}{\rho} \text{div}(-\rho \vartheta \vartheta^1)$$

де ϑ – усереднена в часі швидкість;

ϑ^1 – відхилення ч дійсної швидкості від усередненої (пульсаційна швидкість);

p – усереднений в часі тиск; ρ – густина рідини;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості.

При проходженні процесу виникає сила в'язкого тертя і сила турбулентного тертя [4, 5, 6]. Осьовий рух середовища в отворі обумовлений перепадом тиску. Виникаючі сили в'язкості в граничному шаровому ламінарному русі досить малі відносно турбулентного тертя. Тому ми можемо ними нехтувати. Ламінарний рух завдяки силам в'язкості в граничному шарі потік набуває сталої колової швидкості u_0 . Таким чином, сили в'язкості створюють рух певної маси середовища, що знаходиться між поверхнями утвореного отвору. Ця стала швидкість визначається залежністю: $u_0=0.5\omega r$ відносно стінок поверхні отвору. Відповідно до цього руху діють сили турбулентного тертя, які мають рівномірний рух з рівнодіючою силою рівною нулю. Тому:

$$F_x = -\frac{\theta}{2h} \frac{\rho \vartheta}{2} u_0$$

u_0 – середня колова швидкість середовища від дії РО;

h – ширина шпарини.

Осьова швидкість зміни із рівняння нерозривності буде:

$$\omega = \omega_0 + \frac{0.5\omega l h_0 \varepsilon \sin \varphi z}{h}$$

де ω_0 – середня осьова швидкість обумовлена полем тиску;

ε – ущільнення середовища.

Відповідно витік середовища та пружна гідростатична сила:

$$Q = r \int_0^{2\pi} w_o(\varphi) d\varphi,$$

$$F_c = r l \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 p(\bar{z}, \varphi) \cos(\varphi) d\bar{z}.$$

Для круглих отворів приймають наступні осереднені їх значення: $\mu=0,62$, $\varphi_i = 0,97$, $\zeta = 0,065$, $\varepsilon = 0,64$ [4].

На основі статистичної обробки результатів експериментів [6] одержана така залежність для визначення коефіцієнта витрати при витіканні крізь прямокутний отвір, що використовується в таких межах $1 \leq l/b \leq 10$

$$\mu = 0.62 + 0.0618 \lg l/b, \quad (3.2)$$

де l – найбільший поздовжній розмір отвору;
 b – найбільший поперечний розмір отвору.

Оскільки кількість витoku рідинного середовища залежить від тиску в точці дії робочого органу, то потрібно знати характер розподілу тиску вздовж отвору для прогнозування можливих витоків. А для технологічного безпечного процесу необхідно коригувати тиск на початку дії робочого органу перед отвором, оскільки він є найбільш впливовим з точки зору виникнення течії середовища в робочій камері машини.

Розподіл утвореного тиску і деформацій вздовж дії робочого органу з поверхнею робочої камери і між самими робочим органом дасть змогу визначити величину можливої течії у будь-якій точці їх дії. Виявлені деформації необхідні для моделювання траєкторії течії середовища та площі їх контакту для впровадження заходів із удосконалення дії поверхонь робочої камери і зменшення впливу дії робочого органу на середовище, що є особливо актуальним.

У результаті обговорення і проведеного напрямку дослідження руху тіста в тонких утворених щілинах була подана модель ущільнення, яка дозволяє провести подальші розрахунки витoku та гідродинамічної сили, енергетичних поточкових впливів. Обґрунтування впливу валка на характеристики короткого ущільнення дозволяє нам в повній мірі розглянути ці енергетичні впливи. Ці впливи мають суттєве значення на витік та пружну силу. Особливо коли складова швидкості у коловому напрямку перевищує осьову складову. Тому ми в даному розділі розкриваємо вплив обертових валків на складову гідродинамічних сил.

3.2. Прогнозування можливої течії середовища за їх розмірами

Для розв'язку поставленої задачі об'єктом дослідження вибрано формувальну і тістомісильну машини з циліндричним робочим органом.

Використано промислові і лабораторні вимірювання витрати, тисків, температур, в'язкості на діючих дільницях.

Особлива увага звернута на прогнозування можливої течії середовища за їх розмірами. Експериментальні дослідження процесу витікання рідини з отворів неправильної форми, які мають місце при виникненні дії робочих органів в робочій камері у процесі експлуатації, їх статистична обробка дають змогу визначити коефіцієнт витрати, який потрібно знати для прогнозування течії. Це дозволить прогнозувати походження технологічного якісного процесу.

Прогнозована витрата визначається за залежністю [3]

$$Q = \mu S \sqrt{2g\Delta H} = \mu_{\phi} \cdot S \sqrt{2 \frac{P}{\rho}}, \quad (3.3)$$

де μ – коефіцієнт витрати крізь отвір не круглої форми, який апроксимуємо у вигляді трапеції з діагоналями l і b (залежність (2)).

Геометричні розміри деформації, її глибина та місце знаходження в робочій камері машини є результатом діагностування.

$$\Delta H = \frac{P - P_1}{\rho g}, \quad (3.4)$$

де P – тиск всередині робочої камери на дільниці дії РО;

P_1 – тиск всередині робочої камери, який залежить від середовища, його швидкості течії.

Напір над центром отвору $r / g \rho$ / визначається як віддаль від точки витікання до лінії затягування середовища робочим органом.

Коефіцієнт витрати μ_{ϕ} , який враховує насичення середовища повітрям, рівний [4]

$$\mu_{\phi} = \left(\frac{1}{\mu^2} + \alpha \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (3.5)$$

де α – коефіцієнт опору середовища.

$$\alpha = \frac{2gS^2v_n \cdot L}{Q \cdot k_\phi \omega \cdot v_\sigma \cdot S_1}, \quad (3.6)$$

де v_σ, v_n – в'язкість середовища і повітря;

k_ϕ – коефіцієнт поглинання;

S – площа перерізу отвору;

w – поправочний коефіцієнт на вологість середовища;

Q – витрата середовища без врахування особливостей коефіцієнт поглинання;

S_1 – середня площа перерізу витікаючого середовища через отвір;

L – відстань між місцем знаходження початку течії середовища і місцем розташування відкритого отвору поверхонь робочого огану та робочої камери.

Коефіцієнт поглинання середовищем повітря:

$$k_\phi = \frac{v}{i}, \quad (3.7)$$

де v – швидкість руху.

$$v = \frac{Q}{S_n}, \quad (3.8)$$

де Q – витрата середовища через отвір;

S_n – площа витісненого середовища (визначається з моделі рельєфу);

i – гідравлічний нахил робочого онгану (знаходиться з геометричної моделі (рельєфу)).

Отже кількість середовища, що пройшло крізь отвір за час τ , буде:

$$V = \mu_\phi S \sqrt{2gH} \cdot \tau. \quad (3.9)$$

де τ – витікання з моменту затягування середовища до моменту виходу із отвору [3].

Одним із основних напрямів забезпечення насиченням високої якості атмосферного повітря середовища в поцесі є встановлення та контроль за

додержанням гранично-допустимих деформацій та виконання заходів щодо їх досягнення. Розподіл повітря в турбулентному потоці по вертикалі середовища визначається залежністю:

$$c = c_0 e^{\left| -\left(\frac{3g}{u^2}\right) \cdot h \right|}, \quad (3.11)$$

де c_0 – концентрація над поверхнею середовища в робочій камері;
 u – швидкість повітря.

Приймаємо $u=4,5$ м/с.

Концентрація над поверхнею при швидкості $u=4,5$ м/с складає 12 мг/м^3 .

Будуємо графік розподілу концентрації повітря по висоті (рис. 3.1), використавши залежність (3.11).

Із графіка (рис. 3.1) випливає, що концентрація повітря в середовищі менша, ніж гранично допустима концентрація в атмосфері робочої зони робочої камери (10 мг/м^3) і складає $1,36 \text{ мг/м}^3$ м.

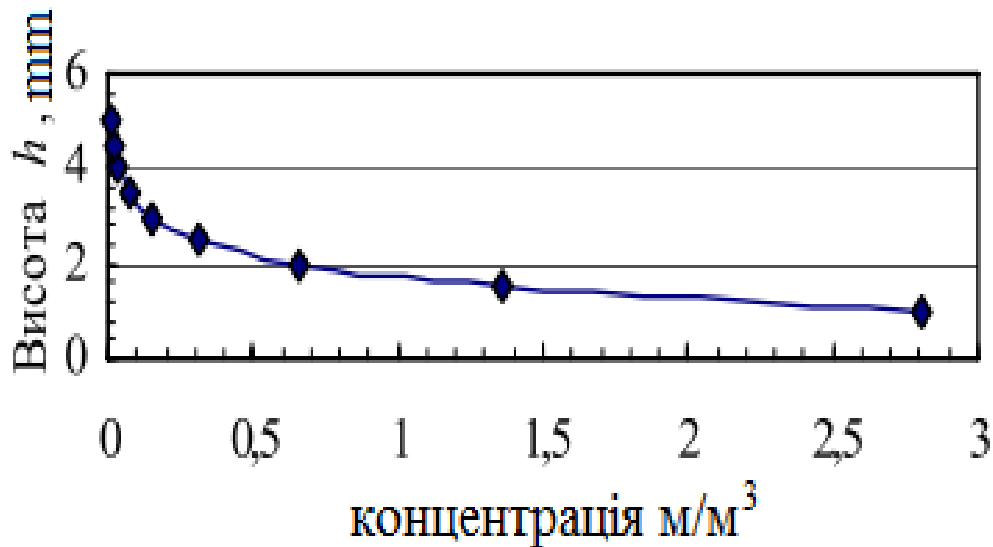


Рис. 3.1. Розподіл концентрації повітря по висоті робочої камери

Побудуємо діаграму кількості насиченого повітря, яке попало в середовище. Із діаграми випливає, що при різко пересіченому профілі отвору при витіканні, основна маса середовища поглинає повітря при виході із отвору.

Найменші показники насичення концентрації присутні в період проходження отвору.

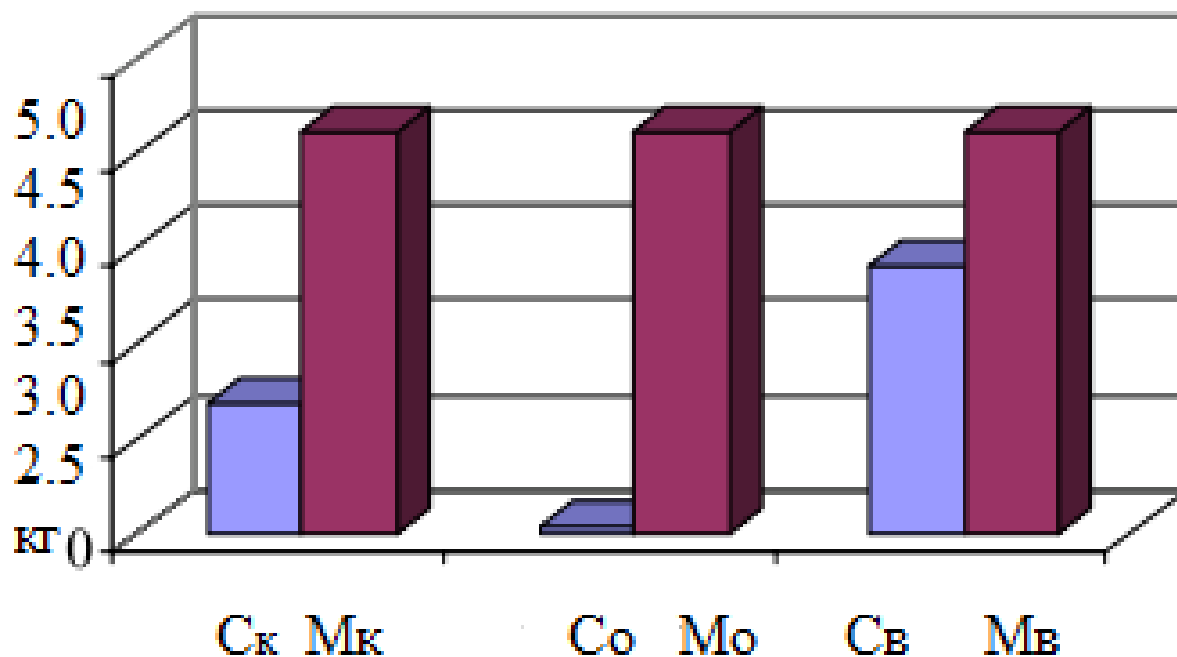


Рис. 3.2. Розподіл кількості насиченого повітря в тісті: $C_k M_k$ – концентрація повітря в робочій камері і маса тіста; $C_o M_o$ – концентрація повітря в проходженні скрізь отвір і маси тіста; $C_b M_b$ – концентрація повітря при виході з щілини і маса тіста

Таким чином, в умовах швидкоплинних зовнішніх тисків саме газова фаза відіграє роль пружної складової, завдяки якій газорідинне середовище може вважатися пружним. Газова фаза розподілена по об'єму рідинного середовища її масою у порівнянні з масою рідинної можливо знехтувати. Термодинамічні співвідношення стосовно газової фази дозволяють визначити її об'ємну деформацію, що є підґрунтям до визначення жорсткості системи. Наявність стабілізованих гідродинамічних параметрів при змішуванні дає підстави вважати їх стабільними, а з врахуванням таких характеристик, як приведена маса і жорсткість здійснює перехід до моделі реального об'єкта.

Рушійний фактор в ній визначається добутком зовнішнього тиску на площу поперечного перерізу шпарини. Протидіючою силою в деформації середовища виступають пружні сили і сили внутрішнього тертя. Одержані вирази дозволяють відслідковувати впливи різних законів зміни зовнішніх тисків на динаміку внутрішніх тисків середовища. Графічне узагальнення результатів наведено на рис. 3.3. Дослідженнями визначено вплив різниці швидкостей входження в контакт рідинної і газової фаз.

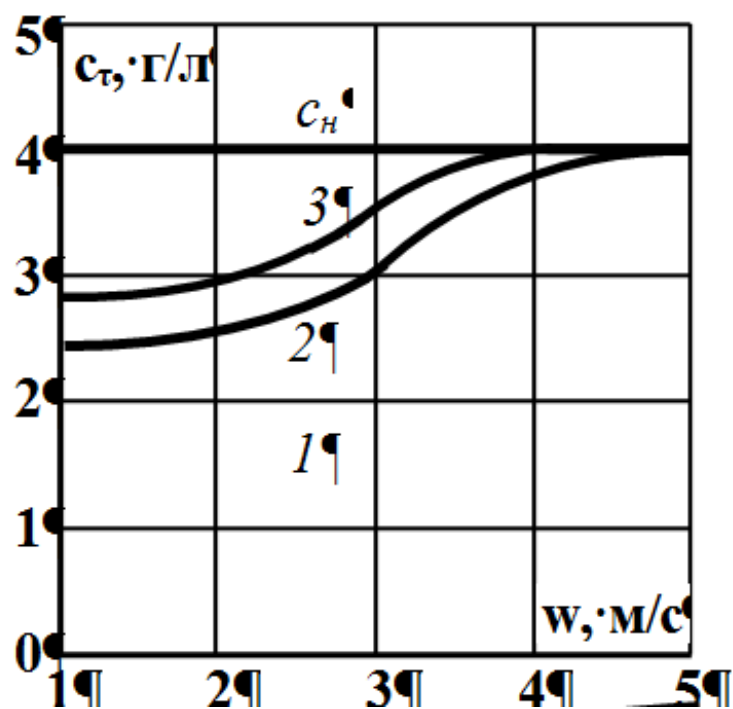


Рис. 3.3. Графік залежності плинної концентрації c_t від швидкості транспортування потоку суміші для: 1 – прямолінійної ділянки; 2 – ділянки з формою траси у вигляді півкола; 3 – ділянки з трасою у формі синусоїди для випадку вертикальної орієнтації дії робочого органу

Моделювання гідродинаміки в потоках стосувалося використання масових сил для інтенсифікації масообміну. Для досягнення позитивних впливів робочого органу нами запропоновано його конструкція, що створює ділянки з радіусами змінної кривини. Це створює відцентрові сили різної величини або різної величини і напрямку, у тому числі і режими м'яких динамічних ударів. При цьому комбінації миттєвих змін сил інерції і їх абсолютних значень можуть бути різними і такими, що на порядок і більше перевищують сили тяжіння.

Ударні явища також супроводжують взаємодію потоків при їх змішуванні. В основу цієї частини досліджень покладено принцип Даламбера, закон збереження кількості руху, закон збереження енергії, теорема Ейлера про зміну головного вектора кількостей руху системи матеріальних точок, теорема Жуковського щодо визначення тисків в системах у режимах гідравлічних ударів, спосіб Релея [7].

Спадаючий характер залежностей вказує на те, що зі зростанням швидкості w фактор інтенсифікації масообміну, пов'язаний з нею переважає аналогічний показник від перепаду швидкостей Δw .

3.3. Визначення течії тіста у шпарині між обертовими валками

Враховуючи вище викладане, основною задачею являється математичне моделювання процесу течії вязкопластичної рідини в шпарині обертових валків із врахуванням сили тяжіння; впливу реологічних властивостей й других факторів на характер течії рідини між валками.

Схема течії подано на рис. 3.4. Початок декартової системи координат розміщено в середині січення мінімального отвору. Вісь y направлена горизонтально, вісь x – вертикально вниз. Рівень тіста в робочій камері $x = x_0$ постійний. Об'ємний расхід тіста G . Колова швидкість валків V , а їх радіус R . Мінімальний отвір між валками $2H_0$, текучий – $2h$. Висота маси тіста над січенням мінімальної шпаринки – ℓ .

В напрямку z течія відсутня. Задача квазіплоска одновимірна по тиску і двовимірна для поля швидкостей.

Виділимо в зоні течії криволінійну трапецію, обмежену січенням x и x_1 . Визначимо потік вектора швидкості через замкнутий контур, проінтегрувавши рівняння нерозривності по висоті щілини

$$\int_0^h \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) dy = \int_0^h \frac{\partial v_x}{\partial x} dy + V \sin \alpha = 0. \quad (3.12)$$

Враховуючи відношення

$$\frac{d}{dx} \int_0^h v_x dy = \int_0^h \frac{\partial v_x}{\partial x} dy + \frac{dh}{dx} v_x(h), \quad \frac{dh}{dx} v_x(h) = \operatorname{tg} \alpha \cdot V \cdot \cos \alpha, \quad (3.13)$$

одержимо рівняння нерозривності в інтегральній формі

$$G = 2 \int_0^h v_x dy \quad (3.14)$$

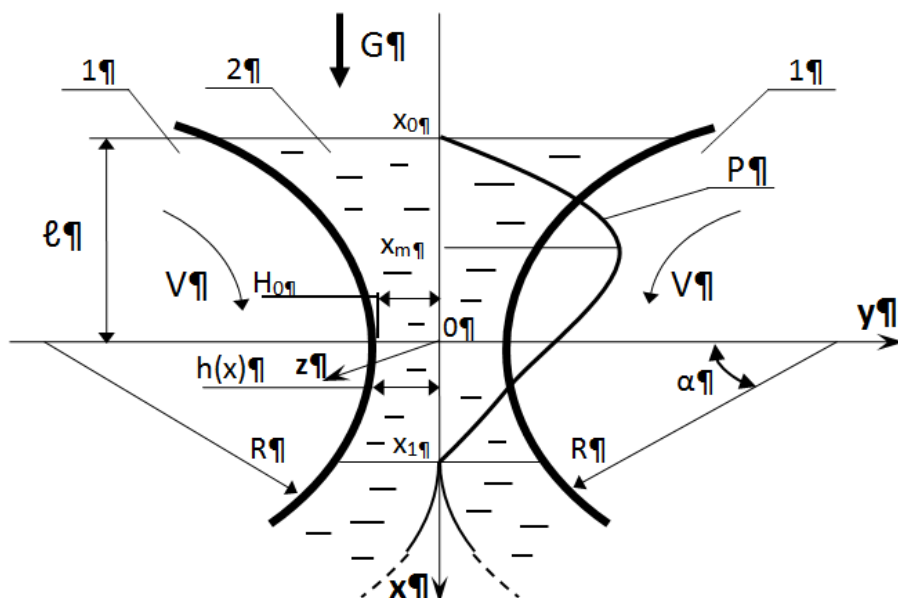


Рис. 3.4. Схема течії тіста у вертикальній щілині між валками:
1 – валки, 2 – тісто

Объемний розхід тіста G постійний по довжині зони течії.

Із врахуванням прийнятих допущень течії, проведемо системою диференціальних рівнянь її рух і реологічний стан:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \rho g, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad G = 2 \int_0^h v_x dy, \quad \tau = \eta \gamma, \quad (\gamma = \partial v_x / \partial y). \quad (3.15)$$

На виході січення $x = x_1$ осьова швидкість однорідна. По січенню $v_x = V$. На вході $x = x_0$ і на виході $x = x_1$ тиск рівний атмосферному, припускаємо $p = 0$.

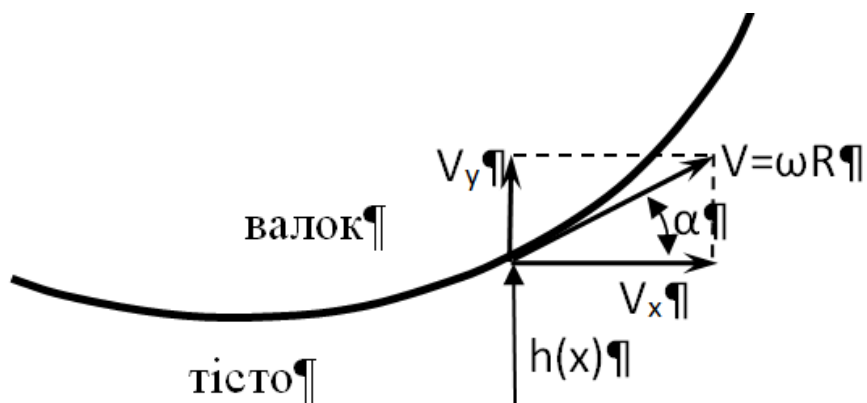


Рис. 3.5. Граничні умови на поверхні валка

Кінематичні умови для поверхні валка (прилипання) умовно виражено в наступних співвідношеннях для компоненти швидкості (рис. 3):

$$v_x = V \cdot \cos \alpha \approx V,$$

$$v_y = V \cdot \sin \alpha = V \cdot x/R.$$

Останній вираз відповідає при умові $x/R \ll 1$.

Граничні умови задачі:

вхідне січення $x = x_0, p = 0,$ (3.16)

умови прилипання $y = h, v_x = V,$ (3.17)

вихідне січення $x = x_1, p = 0, v_x = V, \tau_{xy}(y = h) = 0,$ (3.18)

умови симетрії $x_0 < x < x_1, y = 0, \gamma = 0, \tau_{xy} = 0.$ (3.19)

Проінтегрувавши рівняння руху, маємо

$$\tau_{xy} = (dp/dx - \rho g)y. \quad (3.20)$$

В результаті інтегрування рівняння руху, знаходимо швидкість

$$v_x = V - \frac{1}{\eta} \left(\frac{dp}{dx} - \rho g \right) \frac{h^2 - y^2}{2}. \quad (3.21)$$

А також расхід

$$G = 2Vh - \frac{2}{3\eta} \left(\frac{dp}{dx} - \rho g \right) h^3. \quad (3.22)$$

З рівняння (11) маємо визначення тиску

$$\frac{dp}{dx} = \rho g + \frac{(2Vh - G)3\eta}{2h^3}. \quad (3.23)$$

Течія більшості неньютонівських матеріалів починається за найменших значень напруження зсуву, і їх криві течії мають лінійну залежність між напруженням і швидкістю зсуву тільки за дуже малих і дуже великих значень швидкості. Аномалія в'язкості пов'язана зі структурою рідини та її зміною під час течії.

За малих швидкостей зсуву структура руйнується і повністю відновлюється, при цьому рідина має найбільшу в'язкість; із збільшенням швидкості зсуву руйнування структури починає переважати над відновленням, в'язкість різко зменшується; за великих швидкостей течії структура повністю руйнується, рідина має найменшу (ньютонівську) в'язкість. Відомо, що течія матеріалу залежить від його фізико-хімічних властивостей: від форми і розташування молекул, концентрації, температури, вологості тощо.

Крім псевдопластичної течії, існує також і дилатантна течія речовин, у яких з підвищенням напруження (швидкості зсуву) непропорційно збільшується в'язкість. За дуже високих напружень в'язкість може стати нескінченно великою, що призведе до руйнування речовини. Дилатантні матеріали в інженерній практиці зустрічаються значно рідше, ніж псевдопластичні.

3.4. Трансформації сировинних потоків

Трансформації сировинних потоків в харчових технологіях відбуваються під дією зовнішніх потоків теплової, електромагнітної, хімічної, променевої, механічної, сонячної енергій, енергій гравітаційних полів тощо. Перебіг кожної з трансформацій потоків сировини відбувається за рахунок хімічної енергії самої сировини. При цьому в інтересах існуючих технологій енергетичні витрати з боку зовнішніх потоків мають бути мінімізованими, рівно як і втрати хімічної енергії сировинних потоків.

Кожна з існуючих технологій борошняних виробництв характеризується особливостями таких взаємодій і перетворень і повнота останніх достатньо ілюструється в при бродінні, що характерним для яких є використання газорідних середовищ.

Термін «газорідне середовище» відноситься до систем, у яких присутні газова і рідинна фази. При цьому газова фаза є динамічною і такою, яка під дією гравітаційного поля і Архімедових сил, утворює висхідні потоки відносно рідинної фази, що одночасно є причиною створення вертикально спрямованих циркуляційних контурів. У більшості випадків газова фаза є диспергованою і її утворення пов'язане з анаеробним бродінням, при якому вона генерується внаслідок біохімічних процесів. Енергетичне підґрунтя такого синтезу представлено хімічною енергією речовин живлення мікроорганізмів, трансформація якої супроводжується біохімічними перетвореннями, синтезом цільових речовин і діоксиду вуглецю. Оскільки середовища біохімічного

синтезу характеризуються значною однорідністю щодо живильних компонентів і мікроорганізмів-споживачів останніх, то система вважається такою, в якій диспергована газова фаза також наближається до рівня рівномірно розосередженої. Однак від початку формування однорідність її перебування в рідинній фазі порушується з утворенням циркуляційних контурів.

Аналогічні перетворення мають місце в технологіях збродження виноградної сусла у виноробній промисловості (первинне виноробство), в технологіях вторинного бродиння у виробництві шампанського, при збродженні пивного сусла або цукровмістких середовищ у спиртовій промисловості тощо.

Хоча вхідні сировинні потоки названих технологій мають певні відмінності, однак їх спільною характеристикою є те, що всі вони є носіями хімічної енергії цукрів. Названа спільність продовжується ланцюгом співпадаючих перетворень, який представлено схемою на рис. 3.6.

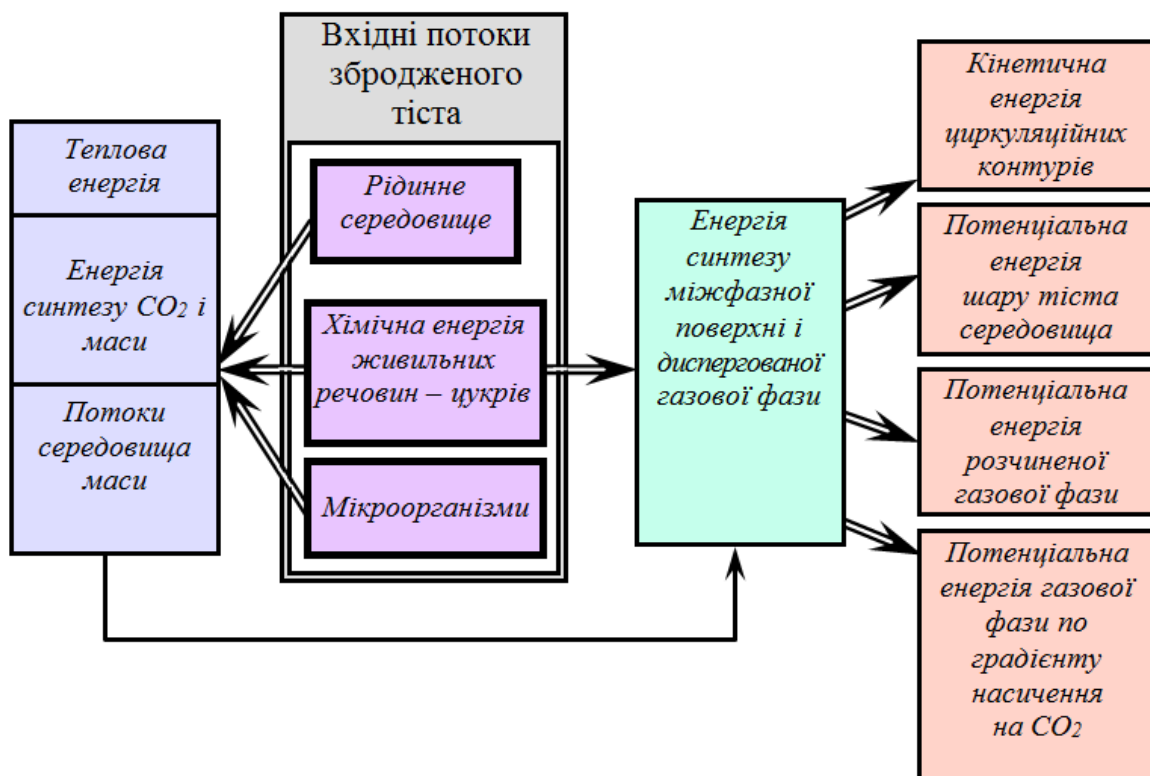


Рис. 3.6. Схема трансформацій матеріальних і енергетичних потоків при формуванні зброженого тіста

Вхідні матеріальні потоки тут представлені рідинним середовищем-розчинником, цукрами як живильними компонентами і мікроорганізмами, а хімічна енергія живильних речовин є основою подальших перетворень.

Загальну оцінку взаємодії вхідних потоків і біохімічного синтезу виконано з рівнем глибокого розуміння перебігу процесів, починаючи від відомого рівняння Гей-Люсака, схеми спиртового бродіння по Ембдену-Мейєргофу-Парнасу і форм бродіння відкритих К.Нейбергом [5]. Першою формою бродіння тіста є нормальне спиртове бродіння з частковим виділенням C_2H_5OH і CO_2 . Друга форма – це бродіння у присутності дії валків для отримання форми бублика. Проте на відміну від цих процесів термодинамічні та фізичні наслідки синтезу діоксиду вуглецю представлені помітно обмежено [9, 10].

Очевидно, що за умови додаткового бродіння при дії валків газова фаза представлена діоксидом вуглецю, динаміка синтезу якого пов'язана з організацією технологічного процесу, що є цілком визначеним і при цьому в режимах перехідних процесів виникає по-висотна нерівномірність вмісту розчиненого CO_2 завдяки гідростатичному тиску.

Аеробні процеси частіше пов'язані з прискореним синтезом маси і супроводжуються технічними заходами для подавання в рідинну фазу кисню, оскільки дріжджі здатні асимілювати лише його розчинену форму.

Аерація тіста при формуванні здійснюється диспергуванням повітря. Оскільки режими аерації регламентуються концентраціями розчиненого кисню, споживач якого присутній в середовищі, то за таких умов неминуче досягається повне насичення його.

Однак при цьому повітря не просто проходить «транзитом» рідинну фазу, а у значній кількості на поверхні поділу фаз присутні масообмінні процеси по кисню, діоксиду вуглецю. Якщо при цьому спрямованість потоку кисню цілком визначена в напрямку від газової фази до рідинної. Такими різнонаправленими можуть бути і потоки CO_2 .

Спряженість названих трьох потоків на поверхнях поділу фаз впливає на інтенсивність масообмінних процесів, однак рушійні фактори при цьому у першому наближенні будемо визначати на основі закону Генрі.

Очевидно, що рівень складності масообмінних процесів на поверхнях мікробіологічних клітин суттєво більший, однак з врахуванням того, що питома поверхня цього масообміну переважає міжфазну поверхню не менше як на три порядки, ця частина віднесена за межі дисертаційної роботи.

Між тим існують можливості впливу на середовища з метою інтенсифікації масообмінних процесів за рахунок використання енергетичних потенціалів, названих в схемі по рис. 3.6. Оцінка можливостей їх реалізації визначає перелік задач цього розділу, а саме:

- гідродинамічні параметри середовищ та інтенсифікація масообмінних процесів;
- фізичне підгрунття в оцінці потенціалів розчинених газів;
- характеристика і параметри вторинного бродіння виноматеріалів;
- визначення інженерних параметрів використання енергетичних потенціалів;
- енергетичні трансформації в процесах бродіння пива.

3.4.1. Фізичне підгрунття в оцінці потенціалів розчинених газів

Практично не використовуваним людством залишається потенціал, який є результатом взаємодії гравітаційного поля і атмосфери Землі. Наслідком такої взаємодії є розчинене в гідросфері повітря, що регламентується законами природи, які визначають впливи на розчинність складових атмосфери.

Відомо, що розчинність газів визначається законом Генрі, за яким стала насичення є пропорційною парціальному тиску газу на поверхні поділу фаз [11]:

$$c_H = k_T P,$$

де k_T – константа Генрі, числове значення якої залежить від фізико-хімічних властивостей рідинної і газової фаз і температури рідинного середовища.

Вказівкою на існування потужного потенціалу розчинених у гідросфері газів є відоме явище, пов'язане з порушенням стану механічної і термодинамічної рівноваги на поверхні поділу фаз у зв'язку з проходженням великих морських суден. Взаємодія корпусів суден, режими їх обтікання водою і, особливо, взаємодія з рушійними гвинтами супроводжується утворенням масивів бульбашок з розчиненої газової фази і частково з атмосфери (рис. 3.7). Зона з порушеною умовою термодинамічної рівноваги супроводжує трасу переміщення судна, а газова фаза, яка поповнюється за рахунок циркуляційних потоків і підведення глибинних шарів води, може існувати до кількох діб. Зародження і існування циркуляційних контурів пов'язане з локальним порушенням однорідності поля гідростатичних тисків, а їх енергетична підтримка забезпечується утворенням диспергованої газової фази.

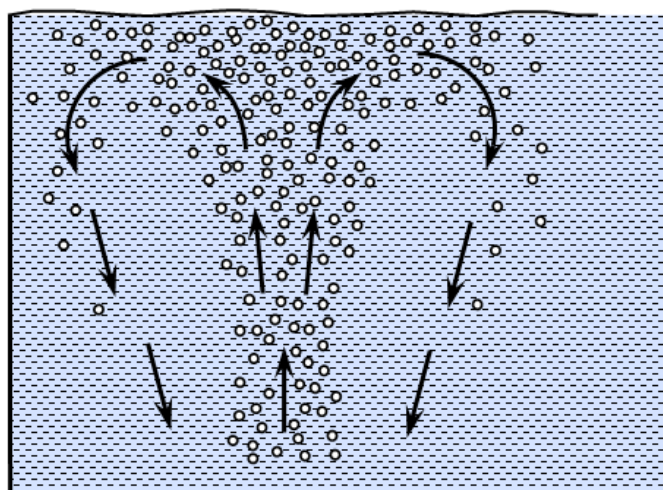


Рис. 3.7. Схема до утворення циркуляційних контурів в газонасиченій гідросфері

Механізм насичення глибоких шарів води має дві стадії. На першому етапі – це розчинення повітря на границі поділу фаз, а на другому – дифузія за рахунок градієнта сталої насичення c_n , яка зростає зі збільшенням глибини h . Присутність розчиненого повітря в гідросфері є загально визнаною, однак інформація щодо рівнів насичення відчутно обмежена. У зв'язку з існуванням підводного рослинного світу і гідробіонтів та процесів окислення органічних речовин, очевидно, що за показником насичення має переважати азот. Однак з точки зору інтересів оцінки енергетичного потенціалу це має обмежений вплив на систему.

Енергетичний потенціал розчинених у рідинних середовищах газів визначається їх кількістю і тиском в системі, який однак не має фізичних проявів за умови термодинамічної рівноваги. Останнє положення слід розглядати як деяку модифікацію системи, що відображується рівнянням Менделєєва-Клайперона, оскільки його ліва частина у формі PV стосується об'єму V чисто газової фази. Однак параметри правої частини MRT відповідають реальному газу, а в сукупності – його енергетичному потенціалу. Підставу на такий гіпотетичний висновок пояснюємо на тій основі, що прояв енергетичного потенціалу розчиненого газу має місце тільки за умови його десорбції і в результаті суто механічної взаємодії з рідинною фазою. При цьому маса газу в такій енергетичній трансформації залишається рівною або кратною M , а газова стала R і температура T відповідають саме газовій фазі. Посилання на деяку кратність маси M пов'язане з тим, що не весь розчинений газ в режимі десорбції завжди переходить у газову фазу. Таким чином енергія десорбційного виділення розчиненої газової фази:

$$E = MRT,$$

а масу утвореної газової фази знайдемо за умовою:

$$M = k_r (P_{(п)} - P_{(к)}) V_p,$$

де $P_{(п)}$ і $P_{(к)}$ – початковий і кінцевий парціальні тиски або фізичні тиски в системі;

V_p – об'єм рідинної фази, з якої виділяється розчинений газ.

Очевидно, що створення енергетичних накопичувальних пристроїв потребує врахування параметрів розчинності. Впливи температур на розчинність газів відображено в табл. 3.1 [92].

Таблиця 3.1
Розчинність газів у воді м³/м³ за парціального тиску 0,1 МПа

Газ	Температура, °С							
	0	5	10	15	20	25	30	40
Азот	0,023	0,020	0,018	0,016	0,015	0,014	0,013	0,011
Кисень	5	9	6	8	4	3	4	8
Водень	0,048	0,042	0,038	0,034	0,031	0,028	0,026	0,023
Діоксид вуглецю	9	5	0	1	0	3	4	1
	0,021	0,020	0,019	0,019	0,018	0,017	0,017	0,016
	5	4	5	8	2	5	0	4
	1,713	1,425	1,194	1,019	0,878	0,759	0,665	0,530

Співставлення даних табл. 3.1 показує суттєву перевагу за значенням розчинності діоксиду вуглецю. Вказану перевагу тим більш логічно застосувати в бродильних технологіях, або в спеціальних технологіях за рахунок примусового насичення рідинної фази діоксидом вуглецю. Так за десатурації 10 кг CO₂ з 1 м³ середовища енергетичний потенціал переходу складе:

$$E = 10 \cdot 188,9(273 + 12) = 538365 \text{ Дж.}$$

Якщо процес десатурації складе у часі 10 с, то потужність енергетичної трансформації оцінюється у середньому обчисленні величиною:

$$N = \frac{E}{a} = \frac{538,4}{10} = 53,84 \text{ кВт.}$$

Одержане значення потужності N приблизно на порядок перевищує імпульси енергетичних впливів в класичних технологіях. Створення на основі розчинених газів енергетичних накопичувачів можливе за штучного одержання різних рівнів термодинамічної рівноваги. Важливо, що закон Генрі дає вказівку на їх досягнення в кількісних співвідношеннях. Підвищення тиску CO_2 в системі з сировиною підвищеної вологості означає зростаючий рівень насичення рідинної фракції і зростаючий енергетичний потенціал. Досліди, які стосувалися ягід винограду, бурякової стружки, подрібнених фруктів тощо привели до однозначного висновку про ефективність швидкоплинного скидання тиску з руйнуванням структур твердої фази на міжклітинному і клітинному рівнях [2, 13–15].

Очікування високого руйнівного рівня десорбції CO_2 з вологої фракції середовищ пов'язується з глибоким проникненням газу у складові середовища, у тому числі і на клітинному рівні.

Фізичне підґрунтя технологій різкого зниження тисків (ТРЗТ) відрізняється від фізичних основ дискретно-імпульсних технологій, хоча за структурною побудовою в отриманні енергетичних впливів вони подібні. В обох випадках передбачається накопичення енергетичного потенціалу з наступним різким переведенням системи в метастабільний стан і до нового стану термодинамічної рівноваги. Аналіз енергетичних потенціалів порівнюваних систем приводить до висновку про їх еквівалентність і наближення потужностей, що реалізуються в НВЧ технологіях.

Відмінністю ТРЗТ-методів порівняно з дискретно-імпульсними технологіями є те, що підвищення їх енергетичних потенціалів супроводжуються різними напрямками зміни температур, оскільки розчинність газів зростає зі зниженням температури, а в ДІТ технологіях збільшенню потенціалів середовищ відповідає зростання температур.

При цьому на увагу в обох випадках заслуговує швидкоплинність зниження енергетичних потенціалів, яка може значно підсилюватися вакуумуванням середовищ. В залежності від рівня входження середовища в незрівноважений стан за показником температури швидкість її зниження може досягати $10...15^\circ\text{C}$ за секунду і більше на початку процесу з поступовим

зменшенням цього показника [17]. Таке швидкісне охолодження досягається за рахунок генерування пари в режимі адіабатного кипіння середовища і стосується всього його об'єму з поправкою на гідростатичний тиск. Особливістю режимів адіабатного кипіння є присутність кавітаційних ефектів, частота появи яких за інших рівних умов залежить від висоти шару рідинної фази, оскільки у зв'язку з гідростатичними тисками верхні шари охолоджуються швидше.

Природа кавітаційних явищ при цьому є традиційною і пов'язаною з конденсацією пари в бульбашках.

Для випадків активної десатурації (дегазації) насичених середовищ можливість кавітаційних ефектів зменшується, оскільки колапс газових бульбашок може пов'язуватися зі збільшенням тиску в системі або зі зменшенням температури, що в умовах ТРЗТ не досягається.

Сучасне апаратне оформлення процесів бродіння і технологій мікробіологічного синтезу зорієнтовані на використання герметичних апаратів, які працюють в умовах підвищених тисків або хоча б за існування в них гідростатичних тисків. Так циліндро-конічні бродильні апарати пивзаводів, акратофори заводів шампанських вин, форфаси пивзаводів, апарати для вирощування мікроорганізмів, для зброджування квасу можуть мати висоту у кілька десятків метрів. Зброджування цукровмістких середовищ означає насичення їх розчиненим діоксидом вуглецю до значень, які відповідають закону Генрі.

При цьому режим насичення має ту особливість, що CO_2 передається в рідинну фазу на молекулярному рівні і лише за досягнення значення сталої насичення C_n стає можливим утворення газової фази. Однак при цьому наявність гідростатичних тисків визначає нерівномірність концентрації розчиненого діоксиду вуглецю. Відповідний концентраційний градієнт формується від початку виділення CO_2 з верхніх шарів середовища, оскільки в більш заглиблених шарах за рахунок гідростатичного тиску насичення поки що не досягається.

3.4.2. Гідродинамічні параметри та інтенсифікація масообмінних процесів в газорідинних середовищах

Газорідинні середовища з дисперговою газовою фазою в значній кількості представлені в бродильних технологіях та в технологіях, пов'язаних з синтезом мікробних культур. В першому випадку вони будуються як анаеробні, а у другому – як аеробні. Очевидно, що ці особливості визначають природу газу

диспергованої фази. За анаеробної системи – це діоксид вуглецю, а за аеробних процесів – це суміш азоту, кисню і діоксиду вуглецю. Хоча фізико-хімічні властивості названих газів різні, однак їх дисперговані у рідинній фазі масиви створюють подібні фізичні поля і подібно реагують на зовнішні збурення систем. Очевидно, що самогенерування газової фази CO_2 у середовищі пов'язане з внутрішнім масообміном, а за аеробних процесів диспергована повітряна фаза генерується за рахунок барботажних або інших процесів. В обох випадках інтенсифікація масообміну пов'язана з гідродинамічним станом середовищ і можливостями впливу на них енергоматеріальними імпульсами. У зв'язку з викладеним розглянемо взаємозв'язки між геометричними характеристиками вузла нагнітання формувальної машини і тіста, гідродинамічними параметрами, механічними імпульсними впливами і масообміном.

Прояв енергетичних наслідків зброджування середовищ відбувається у наступній послідовності.

По-перше, в результаті життєдіяльності мікроорганізмів досягається накопичення в рідинній фазі тіста діоксиду вуглецю з поступовим наближенням до стану насичення. При цьому час настання такого насичення на CO_2 в перехідному процесі та його числовий показник залежать від величини гідростатичного тиску. У зв'язку з цим зона утворення газової фази у формі бульбашок починається з поверхні рідинної фази і поступово розширюється у бік заглиблення у середовище.

За відомої і програмованої швидкості зброджування середовища можливим є визначення швидкості синтезу CO_2 dc_n/dt , $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$. Тоді за умови стабільної кількості мікроорганізмів та інших параметрів бродіння записуємо для елементарного шару товщиною dx на висоті x умову (рис. 3.8).

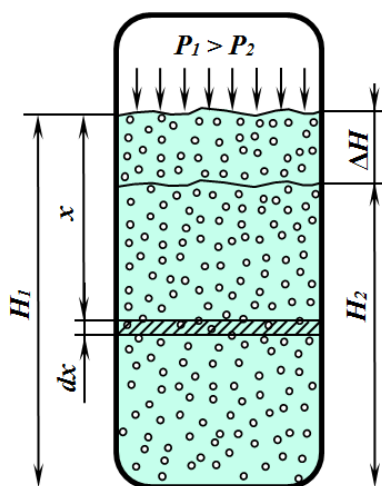


Рис. 3.8. Схема до визначення параметрів квазіпружної газорідинної системи

$$\left(\frac{dc_H}{d\tau} \right) \tau_{(x)} = k_r (P_o + mgx), \quad (3.23)$$

де $\tau_{(x)}$ – час досягнення повного насичення шару на висоті x ; P_o – зовнішній тиск; m – питома маса рідинної фази.

Звідси знайдемо:

$$\tau_{(x)} = k_r \frac{P_o + mgx}{dc_H/d\tau}, \quad (3.24)$$

а час, за якого почнеться генерування газової фази CO_2 у повному об'ємі середовища, визначається за $x = H$. Тоді:

$$\tau_{(x)} = k_r \frac{P_o + mgH}{dc_H/d\tau}. \quad (2.3)$$

По-друге, від моменту початку синтезу диспергованої газової фази розпочинається етап прояву потенціальної енергії набухлого шару газорідинної суміші. Це означає, що середовище вміщує в собі певний об'єм газової фази, що відповідає відомому поняттю утримувальної здатності. Останню у експериментальних вимірах визначають різницею рівнів набухлого $H_{наб.}$ і не набухлого $H_{н.н.}$ середовища:

$$u = F_{ап} (H_{наб.} - H_{н.н.}),$$

де $F_{ап}$ – площа поперечного перерізу апарата, m^2 .

Утримувальна здатність середовища є важливою гідродинамічною характеристикою, пов'язаною з такими параметрами, як поверхня поділу фаз і приведена швидкість диспергованої газової фази $w_{пр}$.

Ефект утворення набухлого шару свідчить, що певна частина газорідинної суміші здійснила переміщення у гравітаційному полі проти сил тяжіння. Це означає, що виконана певна робота, величина якої дорівнює потенціальній енергії $m_{наб.}g\Delta H/2$, де $m_{наб.}$ – маса рідинної фази, що входить в набухлу частину шару. З певним наближенням будемо вважати, що об'єм рідинної фази на ділянці ΔH рівний утримувальній здатності. Це припущення дозволяє вирахувати:

$$m_{\text{наб.}} = \alpha \rho_{\text{рід.}} \quad (3.25)$$

де $\rho_{\text{рід.}}$ – питома маса рідинної фази.

Якщо наступним припущенням вважати, що розподіл рідинної фази в набухлій частині є ізотропним, то потенціальна енергія набухлої частини системи:

$$E_{\text{наб.}} = m_{\text{наб.}} g \frac{\Delta H}{2} = \alpha \rho_{\text{рід.}} g \frac{\Delta H}{2}, \quad (3.26)$$

Розчинений CO_2 має висотний розподіл, що визначає можливість використання відповідного градієнта в якості енергетичного потенціалу. Визначимо загальну кількість діоксиду вуглецю, що перебуває у розчиненому стані. Елементарна по висоті dx ділянка на рівні x (рис. 3.8) вміщує у собі CO_2 у кількості:

$$dM_{\text{CO}_2} = c_n dV = c_n F_{\text{ан.}} dx.$$

Підстановкою c_n одержуємо:

$$dM_{\text{CO}_2} = k_r (P + \rho g x) F_{\text{ан.}} dx,$$

а інтегрування цього виразу дозволяє визначити кількість CO_2 для всього середовища:

$$\begin{aligned} M_{\text{CO}_2} &= \int_0^H k_r (P + \rho g x) F_{\text{ан.}} dx = k_r P F_{\text{ан.}} \int_0^H dx + k_r \rho g F_{\text{ан.}} \int_0^H x dx = \\ &= k_r P F_{\text{ан.}} H + k_r \rho g F_{\text{ан.}} \frac{H}{2} = k_r F_{\text{ан.}} H (P + 0,5 \rho g). \end{aligned}$$

Знайдений енергетичний і відповідний матеріальний потенціали і відповідна їм структура середовища у динамічному стані зберігаються в період усталеної частини процесу формування виробу. Очевидно, що зміни швидкості синтезу CO_2 мають відобразитися на визначених параметра, а також на геометричних параметрах валкових робочих органах та корпусу вузла нагнітання.

По-третє, утворення динамічного газорідинного середовища означає присутність циркуляційних контурів. Природа їх появи пов'язана з переміщенням

диспергованої газової фази, на що вказують відомі теоретичні та експериментальні визначення абсолютної і відносної швидкостей газової фази. Оскільки швидкість спливання газових бульбашок визначається різницею рушійних Архімедових сил та сил опору середовища і Архімедові сили пропорційні кубу визначального розміру, а сили опору – квадрату останнього, то це вказує на нелінійність залежності швидкості відносного руху від розмірів газової фази. Проте, в наших дослідженнях слід відмітити лише те положення, що стосовно середовищ з фіксованими параметрами швидкість газової фази також наближено фіксована. Наприклад, для середовищ з характеристиками близькими до води відносна швидкість бульбашок з діаметром 2...6 мм становить 0,25...0,27 м/с. Разом з тим в умовах газонасичених середовищ абсолютні швидкості перевищують відносні у 2–3 рази і більше, що відповідає залежності:

$$W_{\text{абс.}} = W_{\text{від.}} + W_{\text{рід.}}, \quad (3.27)$$

де $W_{\text{рід.}}$ – середня швидкість винесення газової фази в рідинних циркуляційних контурах.

Наявність висхідних гілок циркуляційних контурів означає присутність опускних і те, що такі контури є замкненими і спрацьовують на підвищення однорідності середовищ. Одночасно вкажемо на зв'язок між утримувальною здатністю середовища по газовій фазі і абсолютною швидкістю, що відображується формулою [7]:

$$u = \int_0^{H_{\text{зар.}}} \frac{M'RT}{P + H_{\text{рід.}} - (H - x)} \cdot \frac{dx}{w_{\text{абс.}}}, \quad (3.28)$$

де M' – масовий синтез CO_2 .

Потенціальна енергія газорідинної системи визначається сукупністю $E_{\text{наб.}}$ та енергії стиснутої газової фази. При цьому в пошуках можливостей силових впливів на газорідинну систему слід звернутися до її квазіпружних властивостей [2, 17]. Розподілена у повному об'ємі диспергована газова фаза виконує роль пружної складової, яка відгукується, наприклад, на зміни тисків. При цьому реакція кожної бульбашки незалежно від її координат в середовищі є повноцінним відгуком на зміну тиску у формі змін розмірів і об'єму. Разом з цим така деформація сукупності бульбашок диспергованої газової фази означає зменшення показника утримувальної здатності, що має супроводжуватися

зменшенням набухання ΔH . Зниження тиску до номінального повинно завершитися стабілізацією параметрів на попередньому рівні. Очевидно, що за таких умов результат силового впливу залежить від динаміки зміни останнього і його величини і цілком досяжним є значення, яке приведе дисперговану газову фазу до колапсу. Така ситуація має оцінюватися повним аналогом кавітаційних ефектів з паровою фазою. Оскільки фізичним підґрунтям колапсу газових бульбашок є тиск, то з врахуванням градієнту гідростатичного тиску він буде відбуватися у послідовності, починаючи з нижніх шарів. Таким чином для таких газонасичених середовищ з дисперговою газовою фазою досягається можливість часткового або повного колапсу з аналогом потужних впливів на рівні кавітаційних.

Якщо силові впливи не досягають значень, за яких відбувається колапс газових бульбашок, то система перетворюється на квазіпружну у формі розподіленої маси по вертикальній координаті. Разом з тим за наявності даних щодо утримувальної здатності по газовій фазі стає можливою оцінка рівня деформації середовища по висоті. Це означає досягнення оцінки пружних властивостей системи на рівні приведеної жорсткості (рис. 3.8). Оскільки у відповідності до рисунку квазіпружне середовище підлягає безпосередній силовій дії у напрямку деформації, то поняття жорсткості і приведеної жорсткості співпадають і визначаються відношенням силової дії до деформації ΔH і тоді:

$$c = \frac{PF_{\text{ап.}}}{\Delta H} = \frac{(P_2 - P_1)F_{\text{ап.}}}{H_1 - H_2}. \quad (3.29)$$

Очевидно, що значення ΔH залежить від рівня деформації газової фази, а кількісною характеристикою останньої, як було показано, є утримувальна здатність. При цьому в залежності від швидкості зміни тиску $dP/d\tau$ процес стискання може бути наближеним до ізотермічного або до адіабатного. Повільне стискання відповідає наближенню до ізотермічного процесу, а прискорене – до адіабатного. У роботі [17] визначено квазіжорсткість газорідного середовища для ізотермічного процесу:

$$c_{\text{із.}} = \frac{P_2^2 F_{\text{ап.}}^2}{u_1 (P_2 - P_1)}, \text{ Н/м}. \quad (3.30)$$

Змінимо останню умову і перейдемо до адіабатного процесу, за якого

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{u_1}{u_2} \right)^{k_a} \quad (3.31)$$

де k_a – показник адиабати, звідки:

$$u_2 = u_1 \sqrt[k_a]{P_1/P_2} \quad (2.32)$$

Тоді деформація середовища становитиме:

$$\Delta H = \frac{V_{\text{рід.}} + u_1}{F_{\text{ап.}}} - \frac{V_{\text{рід.}} + u_1 \sqrt[k_a]{P_1/P_2}}{F_{\text{ап.}}} = \frac{u_1}{F} \left(1 - \sqrt[k_a]{P_1/P_2} \right) \quad (3.33)$$

Останній вираз з врахуванням (3.32) дозволяє записати квазіжорсткість для адиабатного процесу:

$$c_{\text{ад.}} = \frac{(P_2 - P_1) F_{\text{ап.}}^2}{u_1 \left(1 - \sqrt[k_a]{P_1/P_2} \right)} \quad (3.33)$$

Одержані розрахункові формули і результати розрахунків дозволяють відмітити, що квазіжорсткості газорідинних середовищ в обох випадках обернено пропорційні початковій утримувальній здатності і прямо пропорційні квадрату площі поперечного перерізу апарата (середовища). Вплив кінцевого тиску P_2 є більш складним, що відображується сполученням цього показника з початковим тиском в різних комбінаціях (рис. 3.9).

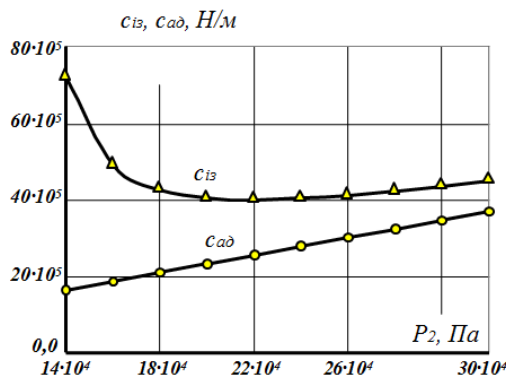


Рис. 3.9. Графіки порівняльних значень жорсткостей газорідинних середовищ $c_{\text{із}}$ та $c_{\text{ад}}$ при $u_1 = 0,1 \text{ м}^3$

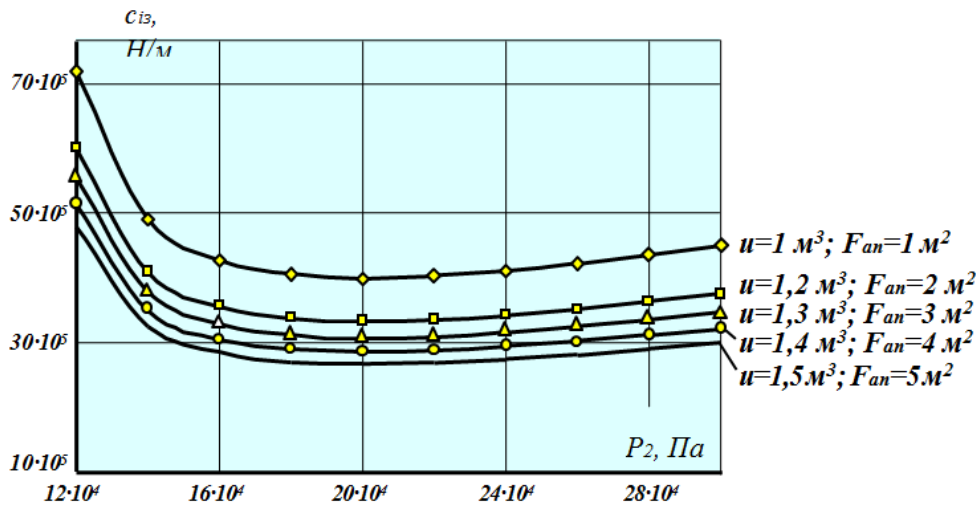


Рис. 3.10. Залежності ізотермічних жорсткостей від тисків P_2 при різних значеннях утримувальної здатності u та площі перерізу $F_{ан}$

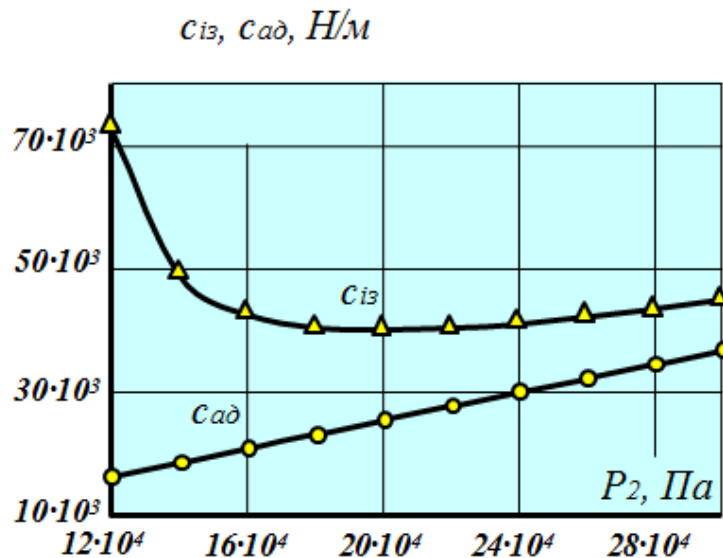


Рис. 3.11. Значення квазіжорсткостей газорідних середовищ при утримувальній здатності $u_1 = 10 \text{ м}^3$, тиску $P_1 = 100000 \text{ Па}$, площі перерізу $F_{ан} = 1 \text{ м}^2$ та показнику адіабати $k_a = 1,4$

Нелінійність ізотермічної жорсткості підтверджена графіками рисунка 3.10 при різних значеннях утримувальної здатності u_1 . Разом з тим збільшення u_1 помітно обмежує обидві форми квазіжорсткості (рис. 3.11). Оцінка комбінацій впливів параметрів u_1 і площі $F_{ан}$ представлена на рис. 3.9.

Залежності квазіжорсткостей при інших співвідношеннях параметрів наведені у додатках на рис. Д 2.1 – Д 2.5.

Виконаємо порівняльну оцінку квазіжорсткостей в ізотермічному і адіабатному процесах за допомогою відповідних розрахунків.

В розрахункових системах, які стосуються пружних і квазіпружних систем в коливальних процесах присутні приведені маси. Останні визначаються на основі принципу еквівалентності кінетичних енергій. Для випадку розподіленої маси газорідинної системи скористаємося принципом Релея і визначимо її приведену масу:

$$m_{\text{пр}} = m/3. \quad (3.34)$$

При визначених приведеній масі і квазіжорсткості системи одержуємо можливість перейти до її розрахункової моделі (рис. 3.12).

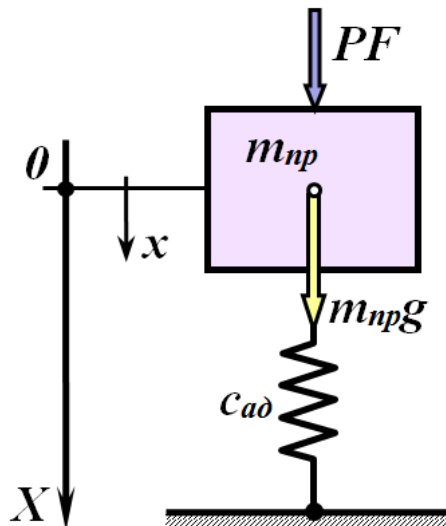


Рис. 3.12. Розрахункова модель системи

Повернувшись до умов (2.13) та (2.9), відмітимо, що перехід від ізотермічного процесу до адіабатного супроводжується різними числовими значеннями жорсткостей з кратністю, що вкладається у 1,5–2 одиниці. Очевидно, що такий результат є очікуваним, однак важливим є те, що за прийнятих фізичних параметрів в обох випадках жорсткості є сталими величинами.

Окрім того маємо засвідчити важливий і принциповий факт, який стосується можливості визначення частоти власних коливань f квазіпружної системи:

$$f = \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}}, \text{ c}^{-1}. \quad (3.35)$$

Відмічене означає, що досягається можливість реалізації пульсаційних впливів у квазіпружних системах з наближенням до резонансних явищ. Оскільки співвідношення жорсткості і маси визначає частоту власних коливань, то це дає можливість вказати на параметри впливу з точки зору інтересів оцінки системи в цілому. До таких параметрів впливів відносяться різниця і співвідношення тисків, геометрія апарата і утримувальна здатність. Останнє означає вплив швидкості генерування діоксиду вуглецю в середовищі і можливість впливу за рахунок рециркуляційного повернення CO₂. Таке повернення разом з продовженням генерування діоксиду вуглецю в системі може забезпечувати різні значення утримувальної здатності у бік їх збільшення незалежно від швидкості зброджування середовища. Для поглибленої оцінки впливів утримувальної здатності звернемось до аналізу системи, математичне відображення якої записуємо у формі рівняння:

$$m_{\text{пр}} \ddot{x} = F_{\text{ап.}} P_2 + m_{\text{пр}} g - c_{\text{ад.}} x . \quad (3.36)$$

Перепишемо цю умову у формі, придатній до інтегрування:

$$\ddot{x} + \frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}} x = \frac{F_{\text{ап.}} P_2}{m_{\text{пр}}} + g . \quad (3.37)$$

У результаті маємо однорідне диференціальне рівняння другого порядку, розв'язання якого залежить від представлення параметрів його правої частини. У першому наближенні будемо вважати, що перехід тиску в системі від значення P₁ до P₂ здійснюється миттєво. За таких умов рівняння (3.37) визначається як лінійне, а його розв'язання визначається коренями його характеристичного рівняння:

$$r^2 + \frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}} = 0 . \quad (3.38)$$

Оскільки корені останньої умови є уявними

$$r_{1,2} = \pm i \sqrt{\frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}}} , \quad (3.39)$$

то розв'язання диференціального рівняння (2.17) має вид:

$$x = A \sin \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau + B \cos \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau + \frac{F_{ап.} P_2}{c_{ад.}} + \frac{gm_{пр}}{c_{ад.}}, \quad (3.40)$$

де сталі інтегрування A та B визначаються за початкових умов:

$$\tau_{(п)} = 0; \quad x_{(п)} = \frac{F_{ап.} P_1}{c_{ад.}} + \frac{gm_{пр}}{c_{ад.}}; \quad \dot{x}_{(п)} = 0. \quad (3.41)$$

Така система оцінюється, як попередньо навантажена тиском P_1 і силою тяжіння. Підстановка початкових умов у рівняння (3.40) дозволяє записати:

$$\frac{F_{ап.} P_1}{c_{ад.}} + \frac{gm_{пр}}{c_{ад.}} = B + \frac{F_{ап.} P_2}{c_{ад.}} + \frac{gm_{пр}}{c_{ад.}} \quad (3.42)$$

Або

$$B = \frac{F_{ап.} P_1}{c_{ад.}} - \frac{F_{ап.} P_2}{c_{ад.}}. \quad (3.43)$$

Для визначення сталої інтегрування A виконаємо диференціювання рівняння (3.40):

$$\dot{x} = A \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \cos \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau - B \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \sin \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau; \quad (3.44)$$

Тоді

$$A \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} = 0; \quad A = 0. \quad (3.44)$$

Підстановка сталих інтегрування дозволяє записати:

$$x = \frac{F_{ап.} P_2 + gm_{пр}}{c_{ад.}} + F_{ап.} \frac{P_1 - P_2}{c_{ад.}} \cos \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau. \quad (3.45)$$

При цьому швидкість деформування системи:

$$\dot{x} = F_{\text{ап.}} \frac{P_2 - P_1}{c_{\text{ад.}}} \sqrt{\frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}}} \sin \sqrt{\frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}}} \tau = \frac{(P_2 - P_1) F_{\text{ап.}}}{\sqrt{m_{\text{пр}} c_{\text{ад.}}}} \sin \sqrt{\frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}}} \tau. \quad (3.46)$$

З форми запису умови (3.46) видно, що деформація середовища за показником швидкості відповідає синусоїдальному закону і максимуму швидкості відповідає значення аргументу:

$$\sqrt{\frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}}} \tau_{\text{max}} = \frac{\pi}{2}. \quad (3.47)$$

Звідси час досягнення максимальної швидкості

$$\tau_{\text{max}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{c_{\text{ад.}}}}. \quad (3.48)$$

Разом з тим прирівнювання (3.46) до нуля дозволяє знайти час досягнення екстремуму в переміщенні x :

$$\tau_{\text{екс.}} = \pi \sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{c_{\text{ад.}}}}. \quad (3.49)$$

Звідси максимальне переміщення приведеної маси:

$$\begin{aligned} x_{\text{екс.}} &= \frac{F_{\text{ап.}} P_2 + g m_{\text{пр}}}{c_{\text{ад.}}} + \frac{(P_1 - P_2) F_{\text{ап.}}}{c_{\text{ад.}}} \cos \sqrt{\frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}}} \pi \sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{c_{\text{ад.}}}} = \\ &= \frac{F_{\text{ап.}} P_2 + g m_{\text{пр}}}{c_{\text{ад.}}} + \frac{F_{\text{ап.}} (P_1 - P_2)}{c_{\text{ад.}}} \cos \pi = \\ &= \frac{F_{\text{ап.}} P_2 + g m_{\text{пр}}}{c_{\text{ад.}}} + \frac{F_{\text{ап.}} (P_2 - P_1)}{c_{\text{ад.}}} = \frac{2F_{\text{ап.}} P_2 + g m_{\text{пр}} - F_{\text{ап.}} P_1}{c_{\text{ад.}}}. \end{aligned} \quad (3.50)$$

Підстановка значення квазіжорсткості (умова (3.13)) дозволяє записати:

$$x_{\text{екс.}} = \frac{(2F_{\text{ап.}} P_2 + g m_{\text{пр}} - F_{\text{ап.}} P_1) u \left(1 - \sqrt[k_a]{P_1/P_2}\right)}{(P_2 - P_1) F_{\text{ап.}}^2}. \quad (3.51)$$

За умови нехтування впливом диспергованої газової фази на гідростатичний тиск надалі будемо вважати, що він визначається висотною координатою тільки рідинної фази:

$$P_{г.с.} = \rho g H_{рід.} \quad (3.52)$$

Звідси витікає можливість визначення тиску в кожному з перерізів середовища на рівні $H_{рід.}$:

$$P_H = P_2 + \rho g H_{рід.} \quad (3.53)$$

Оскільки гідростатичний тиск у кожному фізичному шарі залишається незмінним в режимі деформацій газорідинних середовищ, то це означає, що загальні зміни в них є лише відгуком на зміну зовнішнього тиску.

Раніше було зазначено, що в запропонованій моделі прийнята умова миттєвого переходу в зовнішньому тиску від значення P_1 до P_2 . Практична її реалізація можлива за двох умов, які стосуються загального об'єму надрідинної фази в апараті і можливостей швидкоплинного подавання стиснутого газу з підтриманням стабілізованого тиску об'єму змінної величини. З числа діючого обладнання до названих умов є бродильні апарати (акратофори) у виробництві шампанських вин. Об'єм вільної фази в них наближається до 1...3% від загального об'єму апарата, а присутність, наприклад, ресивера зі стиснутим CO_2 може забезпечити умову швидкоплинної стабілізації тиску на величині P_2 . Очевидно, що подібні системи можуть забезпечувати різні варіації фізичних впливів. Так збільшення тиску означає зростання розчинності газу у відповідності до закону Генрі. Адже утворення диспергованої газової фази за бродіння відбувається на межі її рівноваги з розчиненим CO_2 у рідинній фазі, а тому можливим є порушення такого стану. Рівень порушення може бути таким, який приведе до колапсу бульбашок газової фази, що є фізичним аналогом кавітаційних ефектів. витримка середовища під досягнутим тиском P_2 може бути цілком запланованою і такою, яка залежить від очікуваних технологічних і мікробіологічних ефектів. Однак витримка зі стабілізованим тиском в системі можлива лише після завершення перехідного коливального процесу в квазіпружній системі. Час перебігу перехідного процесу в значній мірі визначається дисипативними властивостями системи, а також законами силових впливів на неї. Очевидно, що тиск P_2 може бути представленим

лінійною або нелінійною функцією часу, утримувальної здатності, фізико-хімічних параметрів середовищ тощо. Якщо тиск P_2 вважати лінійною функцією часу, то умову (2.16) трансформуємо до форми:

$$m_{\text{пр}} \ddot{x} = F_{\text{ап.}} P_2(\tau) + m_{\text{пр}} g - c_{\text{ад.}} x, \quad (3.54)$$

де $P_2(\tau)$ – лінійна функція у формі $P_2 = b_0 \tau$ або $P_2 = b_0 \tau + b_1$; $[b_0] = \text{Па/с}$; $[b_1] = \text{Па}$ коефіцієнти з зазначеними розмірностями.

Відповідною підстановкою отримуємо:

$$\ddot{x} + \frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}} x = F_{\text{ап.}} \frac{b_0}{m_{\text{пр}}} \tau + F_{\text{ап.}} \frac{b_1}{m_{\text{пр}}} + g. \quad (3.55)$$

Тоді

$$x = A_1 \sin \sqrt{\frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}}} \tau + B_1 \cos \sqrt{\frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}}} \tau + \frac{F_{\text{ап.}} b_1}{c_{\text{ад.}}} + \frac{m_{\text{пр}} g}{c_{\text{ад.}}} + \frac{F_{\text{ап.}} b_0 \tau}{c_{\text{ад.}}}. \quad (2.36)$$

Нехай початковим умовам також відповідає рівняння (3.41). За їх використання знайдемо сталі інтегрування A_1 та B_1 :

$$\frac{F_{\text{ап.}} P_1}{c_{\text{ад.}}} + \frac{m_{\text{пр}} g}{c_{\text{ад.}}} = B_1 + \frac{F_{\text{ап.}} b_1}{c_{\text{ад.}}} + \frac{m_{\text{пр}} g}{c_{\text{ад.}}}. \quad (3.57)$$

$$B_1 = \frac{F_{\text{ап.}} P_1}{c_{\text{ад.}}} - \frac{F_{\text{ап.}} b_1}{c_{\text{ад.}}} = \frac{F_{\text{ап.}}}{c_{\text{ад.}}} (P_1 - b_1).$$

Диференціювання (2.36) дозволяє записати:

$$\dot{x} = A_1 \sqrt{\frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}}} \cos \sqrt{\frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}}} \tau - B_1 \sqrt{\frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}}} \sin \sqrt{\frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}}} \tau + \frac{F_{\text{ап.}} b_0}{c_{\text{ад.}}}. \quad (2.38)$$

Тоді

$$0 = A_1 \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} + \frac{F_{ап.} b_o}{c_{ад.}}; \quad A_1 = -\frac{F_{ап.} b_o}{c_{ад.}} \sqrt{\frac{m_{пр}}{c_{ад.}}}. \quad (3.59)$$

Підстановка значень сталих інтегрування дозволяє записати:

$$x = \frac{F_{ап.}}{c_{ад.}} (P_1 - b_1) \cos \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau - \frac{F_{ап.} b_o}{c_{ад.}} \sqrt{\frac{m_{пр}}{c_{ад.}}} \sin \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau + \frac{F_{ап.} b_1}{c_{ад.}} + \frac{m_{пр} g}{c_{ад.}} + \frac{F_{ап.} b_o}{c_{ад.}} \tau. \quad (3.60)$$

У відповідності до обраної фізичної і математичної моделі визначимо силові фактори, що стосуються квазіпружного елемента:

$$P_{пр} = c_{ад.} x = F_{ап.} (P_1 - b_1) \cos \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau - F_{ап.} b_o \sqrt{\frac{m_{пр}}{c_{ад.}}} \sin \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau + F_{ап.} b_1 + m_{пр} g + F_{ап.} b_o \tau. \quad (3.61)$$

Величина $P_{пр}$ в останній умові має розмірність сили і відображує математичну форму моделі. Вона стосується присутності інерційних властивостей системи, хоча їх можливо врахувати через прискорення диференціюванням (3.58):

$$\ddot{x} = A_1 \frac{c_{ад.}}{m_{пр}} \sin \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau - B_1 \frac{c_{ад.}}{m_{пр}} \cos \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau + \frac{F_{ап.} b_o}{c_{ад.}}. \quad (3.62)$$

Тоді діючі сили інерції в системі відображуються залежністю:

$$P_i = m_{пр} \ddot{x} = -A_1 c_{ад.} \sin \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau - B_1 c_{ад.} \cos \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau + \frac{m_{пр} F_{ап.} b_o}{c_{ад.}}. \quad (2.43)$$

Відмінність виразу (3.63) від (3.61) пояснюється тим, що в останньому випадку відсутні статичні складові навантажень.

Вплив на систему змінного тиску $P_2 = P_2(\tau)$ потребує певного обмеження через величину $P_2 = P_{max}$ або через час τ .

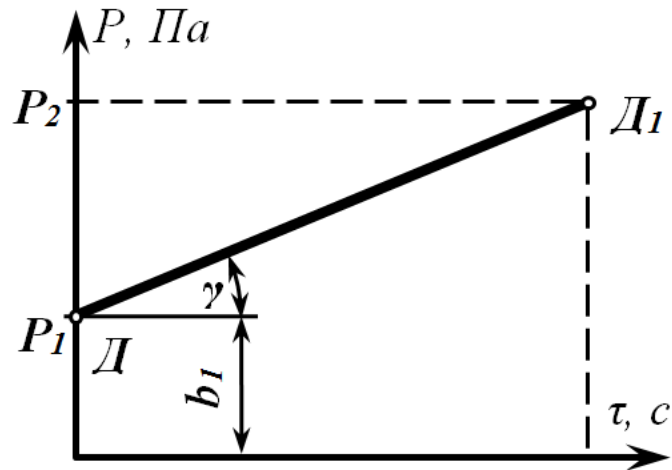


Рис. 3.13. Графік до визначення закону зміни тиску

Для можливості порівнянь припустимо, що максимальні значення P_2 в обох випадках співпадають. Окрім того припустимо, що час досягнення $P_2 = P_{2\max}$ співпадає з часом досягнення екстремуму першого випадку, у якому $\tau_{\text{екс.}} = \pi\sqrt{m_{\text{пр}}/c_{\text{ад.}}}$. Тоді співвідношення, з яких маємо визначити параметри b_0 і b_1 , знайдемо з наступних міркувань, відображених на графіку $P_2 = P_2(\tau)$ на рис. 3.13.

Положення точки $Д_1$ на графіку визначаємо перетином лінії тиску P_2 і визначеного часу $\tau_{\text{екс.}}$. Оскільки зміни тиску починаються від величини P_1 , то положення точки $Д$ на ординаті визначає величину b_1 . Таким чином $b_1 = P_1$. Тоді маємо:

$$\text{tg}\gamma = (P_2 - P_1) / \tau_{\text{екс.}}$$

і звідси

$$b_0 = \text{tg}\gamma = (P_2 - P_1) / \tau_{\text{екс.}}$$

За визначених величин b_0 та b_1 умова (5.40) записується у формі:

$$x = -\frac{F_{\text{ап.}}(P_1 - P_2)}{c_{\text{ад.}} \tau_{\text{екс.}}} \sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{c_{\text{ад.}}}} \sin \sqrt{\frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}}} \tau + \frac{F_{\text{ап.}} P_1}{c_{\text{ад.}}} + \frac{m_{\text{пр}} g}{c_{\text{ад.}}} + \frac{F_{\text{ап.}}(P_2 - P_1)}{c_{\text{ад.}} \tau_{\text{екс.}}} \tau. \quad (3.64)$$

Як бачимо, за умови рівності $b_1 = P_1$ з рівняння (3.60) виключається косинусоїдальна складова.

У відповідності до залежності (3.64) на рис. 3.14 наведено складові, які відображують деформацію квазіпружного середовища.

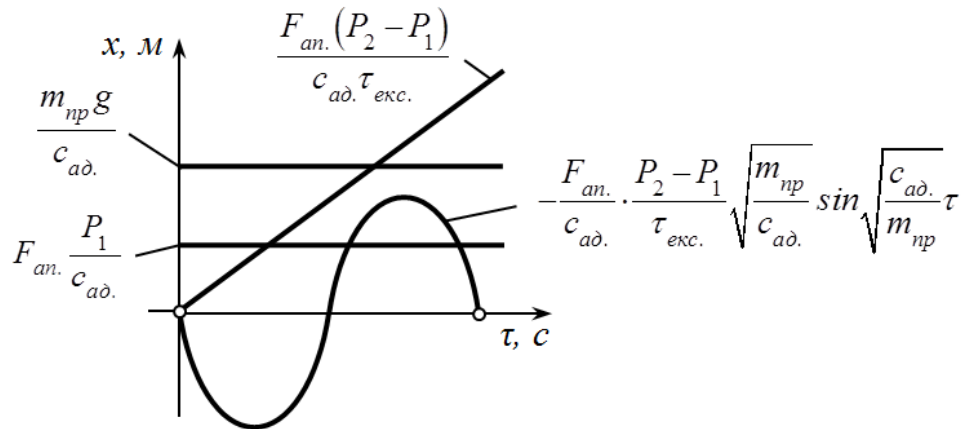


Рис. 3.14. Графік складових деформації квазіпружного

У тому числі тут присутні дві статичні та дві динамічні складові і при цьому досягнення екстремальної деформації настає суттєво пізніше, ніж у попередньому випадку. Для знаходження часу її досягнення запишемо:

$$\dot{x} = -\frac{F_{ан.}}{c_{ад.}} \cdot \frac{P_1 - P_2}{\tau'_{екс.}} \cos \sqrt{\frac{c_{ад.}}{m_{пр}}} \tau'_{екс.} + \frac{F_{ан.}(P_2 - P_1)}{c_{ад.} \tau'_{екс.}} = 0. \quad (3.65)$$

Розв'язання цієї умови відносно $\tau'_{екс.}$ дає відповідь на питання стосовно часу досягнення максимальної деформації середовища.

Важливим з числа можливих відгуків системи на зростання тиску в газовому середовищі, як відмічалось раніше, буде прояв у формі кавітації. Очевидно, що підвищення тиску в системі супроводжується підвищенням розчинності CO_2 і максимальному насиченню при бродінні відповідає нижній шар середовища. Для нього запишемо:

$$c_{H \max} = k_r (P_1 + \rho g H). \quad (3.66)$$

де k_r – константа Генрі.

Виконання швидкоплинного розчинення диспергованої газової фази можливе за умови:

$$c_{H \max} \leq c_{H \text{ кав.}} \quad (3.67)$$

або

$$k_r(P_2 + \rho gH) > k_r(P_1 + \rho gH), \quad (3.68)$$

де $c_{H \text{ кав.}}$ відповідає насиченню кавітації.

Оскільки генерування газової фази здійснюється у самому середовищі, то це означає, що газова і рідинна фази за показником вмісту CO_2 знаходяться у стані термодинамічної рівноваги, а тому всяке збільшення тиску у системі приводить спочатку до припинення виділення CO_2 , а потім до зворотного розчинення диспергованої газової фази. Умовою перебігу таких процесів є підтримання тиску P_2 у газовому просторі. Наступне його зниження до величини P_1 зі швидкістю, яка переважає швидкість деформації середовища, приводить до ефекту розширення стиснутої газової фази і зростання рівня. Наступний етап зростання тиску приведе до повторної реакції середовища.

Очевидно, що перепади зовнішнього тиску доцільно здійснювати з частотою, близькою до частоти власних коливань квазіпружної системи. У зв'язку з цим підвищення точності визначення останньої має важливе значення, а тому до фізичної і математичної моделей слід ввести параметри, що відображують дисипативні властивості середовищ. При цьому умова (2.16) буде змінена до форми:

$$\ddot{x} + \frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}} \dot{x} + \frac{r}{m_{\text{пр}}} x = \frac{F_{\text{ап.}} P_2}{c_{\text{ад.}}} + g. \quad (3.69)$$

Звідси витікає, що коефіцієнт затухання $\delta = r/2m_{\text{пр}}$ пропорційний швидкості деформації квазіпружного середовища. При цьому циклічна частота вільних коливань системи за відсутності сил тертя дорівнює:

$$\omega_0 = \sqrt{c_{\text{ад.}}/m_{\text{пр}}}. \quad (3.70)$$

Випадку затухаючих коливань відповідає умова $\delta < \omega_0$. Характеристичне рівняння умови (3.69) записується у формі:

$$\lambda^2 + 2\delta\lambda + \omega_0^2 = 0, \quad (3.71)$$

з якої одержуємо відповідні корені:

$$\lambda_{1,2} = -\delta \pm i\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \quad (3.72)$$

При дійсних коренях характеристичного рівняння розв'язання (3.69) записується як

$$x = e^{-\delta\tau} \left(A_0 \sin\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau + B_0 \cos\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau \right) + \frac{F_{\text{ан.}} P_2}{\omega_0^2 m_{\text{пр}}} + \frac{g}{\omega_0^2}. \quad (3.73)$$

Початкові умови мають вид:

$$\tau_{(п)} = 0; \quad x_{(п)} = \frac{m_{\text{пр}} g}{c}; \quad \dot{x}_{(п)} = 0,$$

а сталим інтегрування A_0 та B_0 відповідають умови:

$$A_0 = - \frac{\delta \left(\frac{m_{\text{пр}} g}{c_{\text{ад.}}} - \frac{F_{\text{ан.}} P_2}{\omega_0^2 m_{\text{пр}}} - \frac{g}{\omega_0^2} \right)}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}; \quad (3.74)$$

$$B_0 = \frac{m_{\text{пр}} g}{c_{\text{ад.}}} - \frac{F_{\text{ан.}} P_2}{\omega_0^2 m_{\text{пр}}} - \frac{g}{\omega_0^2}. \quad (3.75)$$

Звідси частота власних коливань:

$$f = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{\frac{c_{\text{ад.}}}{m_{\text{пр}}} - \frac{r}{2m_{\text{пр}}}}, \quad (3.76)$$

а з врахуванням (2.13) записуємо:

$$f = \sqrt{\frac{F_{\text{ап.}}^2 (P_2 - P_1)}{u_1 (1 - k_a \sqrt{P_1/P_2}) m_{\text{пр}}}} - \frac{r}{2m_{\text{пр}}} . \quad (3.77)$$

Максимальній деформації середовища відповідає час $\tau_{\text{екс.}}$, який визначається з умови:

$$e^{-\delta\tau_{\text{екс.}}} \left(A_o \sqrt{\omega_o^2 - \delta^2} \cos \sqrt{\omega_o^2 - \delta^2} \tau_{\text{екс.}} - B_o \sqrt{\omega_o^2 - \delta^2} \sin \sqrt{\omega_o^2 - \delta^2} \tau_{\text{екс.}} \right) - \delta e^{-\delta\tau_{\text{екс.}}} \left(A_o \sin \sqrt{\omega_o^2 - \delta^2} \tau_{\text{екс.}} + B_o \cos \sqrt{\omega_o^2 - \delta^2} \tau_{\text{екс.}} \right) = 0 . \quad (3.78)$$

За визначеного часу $\tau_{\text{екс.}}$ досягається максимальна силова дія на квазіпружний елемент системи

$$c_{\text{ад.}} x_{\text{мах}} = e^{-\delta\tau_{\text{екс.}}} \left(c_{\text{ад.}} A_o \sin \sqrt{\omega_o^2 - \delta^2} \tau_{\text{екс.}} + c_{\text{ад.}} B_o \cos \sqrt{\omega_o^2 - \delta^2} \tau_{\text{екс.}} \right) + \frac{c_{\text{ад.}} P_2 F_{\text{ап.}}}{\omega_o^2 m_{\text{пр}}} + \frac{c_{\text{ад.}} g}{\omega_o^2} . \quad (3.79)$$

В останній умові маємо динамічну складову навантаження і дві статичні. Їх співвідношення визначає величину коефіцієнта динамічності:

$$k_{\text{дин.}} = \frac{c_{\text{ад.}} e^{-\delta\tau_{\text{екс.}}} \left(A_o \sin \sqrt{\omega_o^2 - \delta^2} \tau_{\text{екс.}} + B_o \cos \sqrt{\omega_o^2 - \delta^2} \tau_{\text{екс.}} \right)}{F_{\text{ап.}} \left((c_{\text{ад.}} P_2) / (\omega_o^2 m_{\text{пр}}) + (c_{\text{ад.}} g) / (F_{\text{ап.}} \omega_o^2) \right)} . \quad (3.80)$$

Припинення дії тиску P_2 і зниження його до P_1 супроводжується реакцією системи, яка моделюється рівнянням:

$$\ddot{x} + \frac{r}{m_{\text{пр}}} \dot{x} + \frac{c}{m_{\text{пр}}} x = g . \quad (3.81)$$

Йому відповідає етап розширення середовища і для співвідношення $\delta < \omega_o$ маємо розв'язання:

$$x = e^{-\delta\tau} \left(A_1 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau + B_1 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau \right) + \frac{g}{\omega_0^2}. \quad (3.82)$$

$$\begin{aligned} \dot{x} = e^{-\delta\tau} \left(A_1 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau - B_1 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau \right) - \\ - \delta e^{-\delta\tau} \left(A_1 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau + B_1 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau \right). \end{aligned} \quad (3.83)$$

Початкові умови другого етапу відповідають кінцевим першого:

$$\tau_{(II)}^{\Pi} = 0; \quad x_{(II)}^{\Pi} = x_{(K)}^I = x_{\max}; \quad \dot{x}_{(II)}^{\Pi} = \dot{x}_{(K)}^I = 0. \quad (3.84)$$

Звідси

$$B_1 = x_{\max} - g / \omega_0^2; \quad (3.85)$$

$$A_1 = \frac{x_{\max} - g / \omega_0^2}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}. \quad (3.86)$$

Завершенню другого етапу відповідає умова $\dot{x}_{(K)}^{\Pi} = 0$ і відповідний час $\tau_{(K)}^{\Pi}$ визначається з рівняння:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{(K)}^{\Pi} = 0 = e^{-\delta\tau_{(K)}^{\Pi}} \left(A_1 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau_{(K)}^{\Pi} - B_1 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau_{(K)}^{\Pi} \right) - \\ - \delta e^{-\delta\tau_{(K)}^{\Pi}} \left(A_1 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau_{(K)}^{\Pi} + B_1 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \tau_{(K)}^{\Pi} \right). \end{aligned} \quad (3.87)$$

Оскільки час $\tau_{екс.}$, визначений з рівняння (3.78), відповідає часу першого етапу $\tau_{(K)}^I$, то сумарний час перебігу першого і другого етапів складе:

$$\tau_{сум} = \tau_{(K)}^I + \tau_{(K)}^{\Pi}. \quad (3.88)$$

Сполучення параметрів квазіпружних систем може бути суттєво різним і у тому числі таким, який відповідає умові $\delta > \omega_0$ і тоді за уявних коренів (2.71) має місце аперіодичне затухання, за якого:

$$x = C_1 e^{-(\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})\tau} + C_2 e^{-(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})\tau} + \frac{P_2 F_{\text{ап.}}}{\omega_0^2 m_{\text{пр}}} + \frac{g}{\omega_0^2}, \quad (3.89)$$

де C_1 та C_2 – сталі інтегрування.

Відповідними перетвореннями одержуємо:

$$C_1 = \frac{m_{\text{пр}} g}{c_{\text{ад.}}} - \frac{g}{\omega_0^2} - C_2; \quad (3.90)$$

$$C_2 = \left(\frac{m_{\text{пр}} g}{c_{\text{ад.}}} - \frac{g}{\omega_0^2} \right) / \left(1 - \frac{\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}}{\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} \right). \quad (3.91)$$

Час стискання середовища $\tau_{(к)}^I$ знайдемо з умови:

$$\dot{x} = -(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}) C_1 e^{-(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})\tau_{(к)}^I} - (\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}) C_2 e^{-(\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})\tau_{(к)}^I} = 0, \quad (3.92)$$

що дозволяє знайти кінцеві умови першого етапу і записати та розв'язати рівняння руху на другому етапі:

$$x = C_3 e^{-(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})\tau_{(к)}^I} + C_4 e^{-(\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})\tau_{(к)}^I} + \frac{g}{\omega_0^2}. \quad (3.93)$$

За початкових умов $\tau_{(п)}^{II} = 0$; $x_{(п)}^{II} = x_{\text{max}}$; $\dot{x}_{(п)}^{II} = 0$ маємо:

$$C_3 = x_{\text{max}} - C_4 - \frac{g}{\omega_0^2};$$

$$C_4 = \frac{(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}) \left(x_{\text{max}} - \frac{g}{\omega_0^2} \right)}{2\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}}. \quad (3.94)$$

Час завершення другого етапу знайдемо ітераціями з формули:

$$\frac{m_{\text{пр}} g}{c} = C_3 e^{-(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}) \tau_{(к)}^1} + C_4 e^{-(\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}) \tau_{(к)}^1} + \frac{g}{\omega_0^2}. \quad (3.95)$$

За наявності інформації щодо часу перебігу першого і другого етапів загальний час $\tau_{\text{сум}}$ визначається залежністю виду (3.88). Це означає можливість визначення частоти зовнішніх енергоматеріальних імпульсів з наближенням до умов виникнення резонансу.

До числа переваг методу створення імпульсних впливів над газорідним середовищем є те, що завдяки властивостям дії гідростатичних тисків, відображених у законі Паскаля, фізичний вплив стосується всього об'єму середовища в просторовій системі координат. Такий результат суттєво відрізняється від спроб накладання пульсацій у локальних зонах середовищ у формі генерування гідромеханічних впливів.

Феноменологічні міркування вказують на те, що реалізація підвищеного тиску над середовищем супроводжується хвилею розповсюдження в середовищі у напрямку, протилежному переміщенню диспергованої газової фази. очевидно, що це має супроводжуватися деформацією всієї сукупності бульбашок на користь інтенсифікації масообмінних процесів на поверхні поділу фаз і на зміну напрямку переходу CO_2 в рідинну фазу. Разом з тим другий етап, пов'язаний зі зниженням тиску, також означає інтенсифікацію масообміну.

Дещо по іншому слід оцінювати фізику впливів енергоматеріальних імпульсів на газорідні середовища, що перебувають у стадії аеробних процесів у присутності диспергованої фази повітря. Метою таких процесів є інтенсифікація підведення у рідинну фазу розчиненого кисню та відведення синтезованого діоксиду вуглецю. Додатковим завданням аерації середовищ може бути участь газової фази у стабілізації температур на відміну від анаеробних процесів.

Та обставина, що результативність аерації культуральних середовищ оцінюється матеріальним балансом доставки в них кисню і споживанням його мікроорганізмами, вказує на доцільність створення умов, за яких рушійний фактор масообміну мав би якомога більше значення у формі різниці між сталою насичення киснем $C_{\text{H}_2\text{O}_2}$ і плинною концентрацією $C_{\tau\text{O}_2}$. Логіка цього твердження відображується відомою формулою Ньютона:

$$\frac{dM_{O_2}}{d\tau} = k_{O_2} F (c_{nO_2} - c_{\tau O_2}), \quad (3.96)$$

де $dM_{O_2}/d\tau$ – швидкість розчинення кисню в одиниці об'єму;

k_{O_2} – коефіцієнт масопередачі;

F – міжфазна поверхня в одиниці об'єму середовища.

Показник c_{nO_2} визначається характеристиками газової та рідинної фаз і їх термодинамічними і фізико-хімічними параметрами. У зв'язку з цим для обраних умов величина c_{nO_2} повинна рахуватися незмінною і максимальною, а стосовно плинної концентрації $c_{\tau O_2}$ відмітимо наступне.

З точки зору інтересів підвищення ефективності аерації середовищ вказану різницю доцільно мати якомога більшою за рахунок обмеження $c_{\tau O_2}$. Однак таке обмеження має бути чітко регламентованим з точки зору інтересів мікробіологічного забезпечення. Наприклад, в технологіях синтезу хлібопекарських дріжджів значення $c_{\tau O_2}$ пропонується підтримувати біля 25% від стану насичення. Це означає, що першому етапу збільшення тиску відповідає зростання величини c_{nO_2} і, одночасно, зменшення міжфазної поверхні. Окрім того зростає коефіцієнт масопередачі як реакція на зміну гідродинамічного режиму.

Відмічений дуалізм впливу змінних тисків на швидкість розчинення кисню у зв'язку зі змінами параметрів F та c_{nO_2} заслуговує на поглиблене вивчення, однак воно лежить за межами цього дослідження.

3.5. Огляд та аналіз технологічного обладнання для вирощування мікроорганізмів

Процеси вирощування хлібопекарських дріжджів та інших аеробних мікроорганізмів здійснюються на живильних середовищах, які вміщують необхідні органічні і мінеральні комплекси, біостимулятори тощо у присутності розчиненого кисню. Результативність цих процесів у значній мірі визначається динамікою співвідношень концентрацій мікроорганізмів, компонентів, кисню, величин осмотичних тисків середовищ.

Визначальний вплив на приріст біомаси має температура культивування. Її підвищення до оптимальних рівнів при забезпеченні інших умов приводить до

зростання приросту біомаси. З переходом на повітряно-приточні методи вирощування хлібопекарських дріжджів за барботажних аераційних систем досягаються концентрації мікроорганізмів на рівнях від 40 до 90 кг/м³. Проте більшим значенням концентрацій відповідають погодинні прирости біомаси 9...11%, а за менших – до 16...17%. Очевидно, що при цьому принципове значення має абсолютний приріст, оскільки саме він визначає динаміку притоку живлення і навантаження на аераційні системи. Саме можливості останніх у більшості випадків лімітують технологічні процеси [1, 2, 3].

Пояснити це можливо наступним. Ефективність найбільш розповсюджених барботажних систем складає по масі розчиненого кисню по відношенню до маси повітря біля 0,5% у перерахунку на 1 м висоти апарата. Останнє є наслідком відносно низької розчинності кисню, як фізичної властивості останнього. Порівняння його з азотом в абсолютному обчисленні говорить на користь O₂, але у зв'язку з тим, що парціальний тиск кисню у повітрі складає лише 21%, то за аерації сталі насичення на N₂ переважають.

Сучасні спроби розв'язання проблеми пов'язують зі спробами підвищити рівень аерації, тобто за рахунок збільшення повітря, що продувається через середовище за одиницю часу. При цьому ще у 70-ті роки розпочалася дискусія про помилковість використання характеристики рівня аерації, як кількості повітря у м³, що за 1 год. продувається в розрахунку на 1 м³ середовища. Некоректність її полягає у тому, що такий м³ рідинної фази може мати висоту 0,5, 1 або більше метрів, що з точки зору інтересів розчинення кисню є зовсім неоднозначним. Консолідована думка дослідників того часу [14] стосувалася пропозиції оцінювати рівень інтенсивності аерації величиною приведеної швидкості газової фази, тобто відношенням об'ємного газового потоку у м³/с до площі поперечного перерізу апарата у м², що дає розмірність приведеної швидкості у м/с. Якщо на той час така пропозиція була визнана працівниками галузі по виробництву хлібопекарських дріжджів [4], то в інших галузях (мікробіологічній, бродильній) вона залишилася малопомітною.

Однак за величиною вхідного енергетичного потоку оцінка інтенсивності аерації співпадає з показником приведеної швидкості, що свідчить на користь останньої.

Важливим компонентом роботи апаратів для вирощування хлібопекарських дріжджів є наявність у середовищі поверхнево-активних речовин. Наслідком їх існування є активне піноутворення, існування якого можливо оцінювати подвійно. З одного боку утворення розвинутої коміркової структури забезпечує відносно високий рівень насичення киснем рідинної фракції. Але при цьому різко

обмежується масообмін, пов'язаний з іншими компонентами живлення, а тому такі ж обмеження стосуються приросту тієї частини біомаси, що знаходиться в пінній фракції. Окрім того, зростаючий рівень останньої врешті решт заповнює весь газовий об'єм апарата, що загрожує винесенням піни у витяжну трубу. Для попередження таких наслідків використовують автоматичні системи піногасіння, за сигналом яких в апарат подаються жирні кислоти або їх емульсії, що активно руйнують піну. Однак присутність жирних кислот піногасника помітно впливає на масообмін на міжфазній поверхні, утворюючи на ній мономолекулярний шар плівки додаткового опору.

Світові тенденції розвитку аераційних систем представлені також аераторами-диспергаторами. Головна ідея їх виконання полягала в тому, що утворення міжфазної поверхні здійснюється на рухомій лопаті, яку активно обтікає рідинна фаза [5] (рис. 3.8).

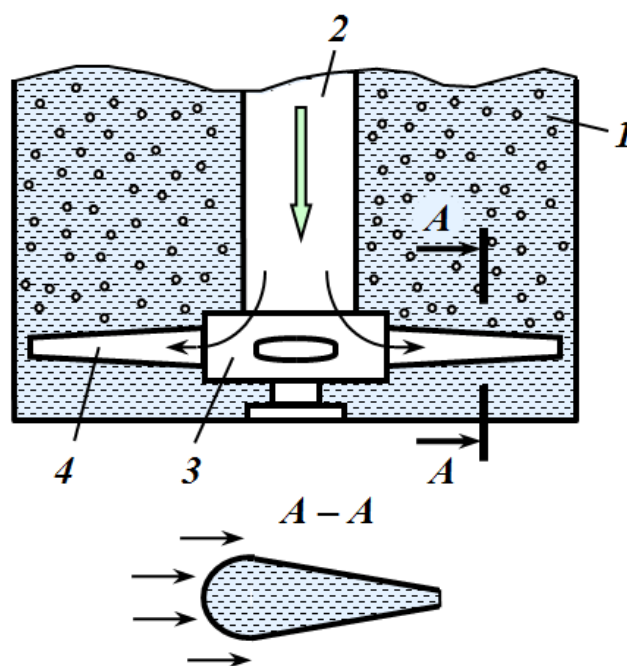


Рис. 3.8. Схема аератора-диспергатора: 1 – корпус апарата; 2 – повітровід;
3 – колектор; 4 – лопаті

Звичайно лопаті виконуються з поздовжніми щілинами на задній частині і ефект подрібнення газової фази залежить від швидкості обтікання їх культуральним середовищем. Таке конструктивне оформлення виглядає суттєво складніше барботаژної аераційної системи і складності в значній мірі стосуються експлуатаційних режимів. Приведення в дію ротора в складі повітроводу, колектора і лопатей може здійснюватися від верхнього привода через повітровід, який при цьому виконує роль трубовала. Значна довжина останнього викликає

додаткові вимоги до виготовлення, монтажу та експлуатації. У випадку нижнього розташування приводу необхідно вирішувати задачу створення і експлуатації ущільнюючих вузлів, що в умовах низьких значень $pH = 2,8 \dots 4,0$ середовищ є доволі складним.

Однак не зважаючи на такі недоліки, в Україні знайшли застосування подібні апарати, які і до сьогодні експлуатуються в промисловості. В умовах безвідбірних технологій за обмеженого приросту біомаси (9...10%) досягаються концентрації дріжджів до 80 кг/м^3 . Але вказана величина погодинного приросту за корисного об'єму апаратів біля 70 м^3 наближається до аналогічного показника апаратів з барботажною аераційною системою [6, 7].

При цьому окрім величини погодинного приросту біомаси обов'язково має враховуватися вихід готової продукції по сировині. Саме ця характеристика є узагальнюючим індикатором системи по рівню кисню. Збільшення концентрації останнього посилює аеробний характер перебігу процесу синтезу біомаси, обмежуючи напрямом бродіння. Коливання виходу по малясі, що перероблюється, мають доволі широкий діапазон від 60 до 90%, хоча теоретично в розрахунку на дріжджі 75%-ної вологості він складає 110%. З переходом хоча б на часткове анаеробне бродіння в середовищі починає утворюватися етиловий спирт, який активно виноситься газовою фазою і є головною складовою технологічних втрат. Для досягнення найкращого результату зусилля технологів спрямовуються на підтримання мінімальної концентрації цукрів і максимально можливого вмісту кисню. Це означає необхідність використання чутливих засобів визначення технологічних параметрів процесу і керування ними.

У зв'язку з відміченим, саме кисню, розчиненому у середовищі, належить важлива роль регулятора, що і визначає важливість досконалості і ефективності аераційних систем. Паралельно до наукових досліджень мікробіологів та технологів [6, 7] виробництва хлібопекарських дріжджів, як і мікроорганізмів взагалі, існує необхідність поглибленого аналізу всіх складових процесів, які завершуються безпосередньо синтезом біомаси і подальшими етапами її підготовки до товарного виду та реалізації.

У зв'язку з цим зростає вагомість матеріального і енергетичного аудиту, оцінка кожної складової економічних витрат в структурі собівартості продукції. Особливої уваги заслуговує вибір конструкції товарних апаратів. Аналіз показує, що в такому виборі вже на першому кроці, який стосується визначення співвідношень геометричних апаратів і мінімізації витрат матеріалу на циліндричний апарат, то слід зупинитися на рівності його діаметра і висоти, оскільки саме за цих умов досягається мінімізація його поверхні. Але у зв'язку

з тим, що в апараті має передбачатися біля 30% його об'єму для газової фази, це означає, що у рідинній фазі, як і у газорідинній суміші, перевагу буде мати діаметр. Проте при цьому виникають проблеми, пов'язані з досягненням рівномірного розподілу повітря, що подається на аерацію по поперечному перерізу апарата, обмежується величина гідростатичного тиску і пов'язані з ним парціальні тиски кисню в газовій фазі, та сталі насичення киснем, які визначають рушійний потенціал процесу масопередавання. Окрім того, співвідношення висоти і діаметра газорідинного шару впливає на гідродинамічний режим останнього, а рівно і на ефективність масообміну. Однак до цього часу відсутні чіткі визначення впливу вказаного співвідношення на результативність аерації, тому до числа одного із завдань цього дослідження віднесена його оцінка.

Оскільки величини виходів біомаси не перевищують 80% по масі перероблюваної маляси, або навіть складають 60...70%, то це визначає необхідність і доцільність удосконалення як аераційних систем, так і апаратів в цілому, а також технологій вирощування хлібопекарських дріжджів.

На цей висновок наводять, зокрема, міркування про вплив окремих факторів, що супроводжують процеси вирощування мікроорганізмів. Наприклад, за зростання співвідношення висоти до діаметра має місце подвійний вплив. По-перше, зростає середня стала насичення, що йде на користь процесу масопередачі, проте підвищене вилучення кисню в решті решт може привести до того, що на певній висоті середовища концентрація O_2 в газових бульбашках стане близькою до нуля і масообмін з киснем припиниться або навіть змінить напрямок. Подвійний вплив також має температура культурального середовища, бо її зростання, наприклад, зменшуючи в'язкість рідинної фази прискорює масообмін, але одночасно зменшує сталу насичення киснем на користь зменшення масопередавання. Щось подібне має місце і у параметрах гідродинаміки, бо зменшення гідростатичного тиску зі спливанням газових бульбашок збільшує їх розміри, а рівно і поверхню масопередавання, але одночасно зростає швидкість відносного руху, що зменшує газоміст або утримувальну здатність по газовій фазі.

Пошук узагальненої оцінки впливів різних фізичних і хімічних факторів звичайно завершують використанням відомої формули масообміну:

$$\frac{dM}{dt} = kSF,$$

де k – коефіцієнт масопередавання;

S – площа поверхні масопередавання;

F – рушійна сила процесу, що ґрунтується на загальному підході у створенні та використанні лінійних кінетичних рівнянь, які у більшості випадків не охоплюють всю багатогранність і складність явищ.

Такого типу рівняння можуть бути використаними для пошуку напрямків інтенсифікації в передбаченні про незначне відхилення параметрів від стану термодинамічної рівноваги і малості градієнтів потенціалів перенесення. Для аналізу нелінійних співвідношень між потоками перенесення і градієнтом потенціалу слід використовувати підходи і принципи термодинаміки незворотних процесів. Це означає, що пропорційність між параметрами M , k , S і F зникає і на разі виникає необхідність уточнення наведеної залежності. На це ж вказують і наведені раніше висновки щодо подвійних впливів окремих термодинамічних факторів на масообмін.

Результатом введення в рідинну фазу газової складової є виникнення активних вертикальних циркуляційних контурів, які також мають подвійний вплив на результати масообміну і технологічний процес взагалі. Їх існування приводить культуральне середовище до стану, близького до того, яке відповідає реактору ідеального змішування, вирівнюючи в ньому концентрацію всіх складових. Але разом з тим існування таких контурів спричинює зростання абсолютної швидкості газової фази у 2 і навіть 3 рази, порівняно зі швидкістю відносного руху. Адже саме остання визначає швидкість оновлення поверхні масопередавання на межі поділу фаз на рівні рідинних плівок, в яких чиниться головний опір масопередаванню для малорозчинних газів. У зв'язку з цим на рівні кількох десятиліть велися пошуки в напрямку створення аераційних систем рівномірного розподілу газової фази [7]. Разом з тим існування потужних циркуляційних контурів означає помітний перерозподіл вхідного енергетичного потоку на їх користь. Кінцевим результатом тут є енергетичні і економічні витрати на охолодження середовищ. В дослідженні [8] наведена оцінка співвідношення перерозподілу енергетичних потоків, за якою від 60 до 70% енергетичні витрати стосуються саме циркуляційних контурів.

Розуміння такого становища у значній кількості випадків [4] підштовхувало до спроб використання цієї енергетичної складової на користь масообміну. Слід додатково звернути увагу на те, що кінематичні параметри газорідинного середовища оцінюються як наближено стабільні. Переведення їх до режимів, характерних для перехідних процесів, слід оцінювати як перспективний напрямок інтенсифікації масообміну. Такий підхід реалізується в конструкції моделі барботажний аераційний пристрій виконано у вигляді

центральної кільцевої частини, змонтованої в нижній частині дифузора та периферійної частини, встановленої між корпусом і дифузором зі з'єднанням обох частин подільником потоку повітря. При цьому подільник по чергово підводить повітря то в центральну, то в периферійні частини аераційної системи, змінюючи таким чином спрямованість циркуляційних контурів. Результатом таких дій є зростання утримувальної здатності по газовій фазі та інтенсифікація тепломасообмінних процесів.

Викладений вище огляд літературних джерел і досвіду промисловості дозволили виконати оцінку і визначити основні чинники впливу на технологічні процеси вирощування аеробних мікроорганізмів. До них відносяться співвідношення геометричних параметрів реакторів, фізичні та хімічні характеристики середовища, впливи температурних параметрів, можливості температурної стабілізації, величини вхідних матеріальних і енергетичних потоків, трансформації газової фази, гідродинаміка газорідинних потоків тощо.

Очевидно, що за такого набору чинників повинні існувати їх співвідношення, за яких мають виникати синергетичні ефекти як подвійні, так і більш високих рівнів. Все це вказує на необхідність подальшого вивчення складних за формою і організацією взаємодій газової і рідинної фаз, які слід очікувати на рівні нелінійних термодинамічних процесів. У зв'язку з цим наступна частина огляду буде стосуватися особливостей масообміну і можливостей їх інтенсифікації.

3.6. Особливості гідродинаміки і масообміну в газорідинних середовищах в умовах енергетичних збурень

Дискретно-імпульсні технології зародилися в результаті поглибленого вивчення явищ адіабатного закипання, які розцінювалися на рівні негативних проявів у високотемпературних енергетичних системах. Проте подальший розвиток криогенної, медичної, харчової та хімічної галузей привів до переоцінки первинних поглядів відносно адіабатного кипіння і його фізичних, структурних і навіть хімічних наслідків.

Організований і цілком детермінований за енергетичними параметрами адіабатний процес кипіння рідинних середовищ перетворився на метод акумулювання теплового енергетичного потенціалу у тому числі й на значних відрізках часу, що потім реалізується з метою впливу на середовища як надзвичайно швидкоплинний процес, потужності якого на порядок або навіть

на кілька порядків перевищують традиційні технології обробки.

При цьому відбувається трансформація теплового енергетичного потенціалу в енергію кавітаційних явищ з такими складовими, як механічна, акустична, електромагнітна, хімічна енергії тощо. Названа сукупність різновидів синтезованих таким чином енергетичних проявів має ознаки синергетичних впливів, позитивними наслідками яких можуть бути стрибкоподібні або у всякому разі прискорені явища розчинення, емульгування, диспергування, екстрагування тощо. На жаль, кількісні співвідношення синтезованих таким чином енергетичних потоків частіше є недетермінованими, у зв'язку з чим ускладнюється оцінка адитивності ефектів парних або більш високих рівнів взаємодій.

Проте наступний принцип концентраційної вибіркової, на якому базується методика інтенсифікації технологічних процесів в дискретно-імпульсних методах обробки, є цілком досяжним. Цей принцип визначає необхідний рівень енергетичного впливу у визначеному місці і в необхідний час або необхідну частоту їх проявів.

Пошуки методів інтенсифікації технологічних процесів обов'язково супроводжуються оцінкою їх "енергетичної вартості". Існують твердження про те, що найменші енергетичні витрати мають місце за пульсаційних форм впливу на середовища [19, 20] (принцип дискретності). Значна кількість впливів реалізуються саме в пульсаційній формі, хоча традиційно вони вважаються стаціонарними. Проте за більш ретельного вивчення фізики явищ можливо виявити пульсаційну складову на низькому або високому ієрархічному рівнях. Такі процеси як диспергування і емульгування здійснюються в результаті одиничних актів впливу на систему. Але розчинення, екстракція, кристалізація тощо реалізуються за рахунок дискретного підведення або відведення рідинних фаз до міжфазної поверхні.

Наведені визначення складових інтенсифікації масообмінних процесів можуть бути віднесені як на паро-рідинні середовища, так і на системи, що являють собою суміші рідинної і газової фаз, які можуть утворюватися за рахунок примусового введення і диспергування певним чином газової фази або за рахунок синтезу газової фази в самому середовищі внаслідок хімічних або біохімічних процесів.

Метою технологічних або хіміко-технологічних процесів є трансформація і перетворення матеріальних потоків, які у більшості випадків потребують підведення ззовні енергетичних потоків, наслідком дії яких є підтримання температур, тисків, перебігу змін в середовищах, фазових переходів тощо.

До числа енергетичних впливів, що стосуються харчових і мікробіологічних технологій, відносяться теплові, механічні, електричні, магнітні, акустичні і хімічні впливи.

Дискретно-імпульсні технології у своїй більшості прийнято відносити на рахунок теплових методів обробки. Їх фізичним підґрунтям є використання залежності між тисками і температурами фазових переходів і ефектами, які супроводжують переведення систем у метастабільні стани і вихід з них у напрямках до нових станів рівноваги. Реалізація цих методів супроводжується накопиченням енергетичного теплового потенціалу рідинної фази за підвищених тисків з наступним різким зниження останніх. Наслідком швидкоплинного переходу у метастабільні стани є наступне активне утворення у повному об'ємі парової фази, диспергованої у формі бульбашок, що означає присутність явища розриву суцільності середовища. Саме таким чином відбувається трансформація накопиченого теплового потенціалу частково на здійснення фазового переходу і частково на утворення механічного імпульсу, генерацію акустичних коливань, потенціальну енергію збільшення рівня газорідинного шару.

Інтенсифікація більшості масообмінних процесів пов'язується з гідродинамічним станом середовищ і рівнем їх кінетичної енергії, турбулентності тощо. Проте всяка турбулізація у свою чергу за наявності внутрішнього тертя завершується трансформацією кінетичної енергії в теплову за рахунок дисипації. Таким чином частка енергетичних перетворень на користь інших видів енергетичних складових, окрім енергії фазового переходу, певною мірою знову трансформується в теплову. Енергетичний потенціал, пов'язаний з утворенням парової фази і міжфазної поверхні можливо також повернути до рідинної фази за рахунок різкого підвищення тиску в системі. При цьому втрати теплової енергії суттєво обмежені у зв'язку з рівністю теплоти пароутворення і конденсації. Збільшення тиску приводить до стискання, а потім і до колапсу парових бульбашок. Це означає повернення до суцільності рідинного середовища, яке супроводжується новою генерацією механічного впливу, акустичної енергії в ультразвуковому діапазоні тощо.

Зародження і колапс ансамблів парових бульбашок супроводжується утворенням інтенсивних мікротечій з високими значеннями локальної швидкості, прискореннями і тисками, які і виступають в ролі факторів інтенсифікації тепло- і масообмінних процесів.

Оскільки у більшості випадків задачі інтенсифікації технологічних процесів пов'язуються з трансформацією енергетичних потоків, то доцільною є

оцінка наслідків різних енергетичних впливів на середовища.

Теплові впливи у більшості здійснюються за рахунок передавання теплової енергії від теплоносія. Передавання теплоти може здійснюватися теплопередаванням через стінку або безпосереднім введенням теплоносія в рідинну або газову фазу. Разом з тим нагрівання може здійснюватися за рахунок акустичних, механічних, електромагнітних і радіаційних теплових потоків, а наслідками теплових впливів можуть бути кипіння, фазові переходи, інверсія фаз, ефект Соре (перенесення речовини за рахунок теплопровідності), термoeфекти (зміни фізико-хімічних властивостей речовин внаслідок нагрівання або охолодження), ефект Марангоні (несталість коефіцієнта поверхневого натягу), структуроутворення (формування регулярних структур за рахунок теплових потоків).

Механічні впливи поділяють на лінійні перевантаження, вібраційні дії та ударні дії.

Лінійним перевантаженням відповідають кінематичні впливи за прискореного руху джерела коливальних процесів. Вібраційні впливи відповідають коливальним процесам і вони можуть бути стаціонарними, нестаціонарними, випадковими. Характеристиками ударних впливів є амплітуда і подовженість у часі силових дій. Результатом механічних впливів можуть бути турбулентність, гідравлічний удар, ефект Кармана (вихороутворення – періодичне зривання вихорів при обтіканні тіла потоком рідини), трибоефект (перетворення механічної енергії в теплову), ефект Рейнольдса (збільшення тепломасовіддачі за рахунок збільшення швидкості потоків), автоколивання, в яких енергія руху з постійними кінематичними параметрами перетворюється в енергію коливальних рухів.

З точки зору інтересів більшості технологій харчових виробництв мають місце трансформації енергетичних потоків у механічні впливи і навпаки. Найпоширенішою можливо вважати трансформацію теплової енергії у кінетичну енергію циркуляційних контурів. Можливість такої трансформації ґрунтується, по-перше, на тепловому розширенні рідинної фази при нагріванні, і, по-друге, – на утворенні парової фази і нерівномірності її розподілу. Очевидно, що друга обставина суттєво переважає першу, однак і у цьому випадку мають місце лімітуючі фактори. До останніх відносяться парові екрани на теплопередавальній поверхні і прискорене винесення парової фази у циркуляційних контурах.

Стосовно газорідних середовищ, утворених введенням газового потоку в рідинну фазу, за рівності їх температур фактором інтенсивного

перемішування залишається нерівномірність розподілу по об'єму реактора диспергованої газової фази. При цьому підвищення рівня вхідного газового потоку буде нелінійно підвищувати інтенсивність трансформації його енергії в енергію циркуляційних контурів і рівень масопередавання. Дослідження різних авторів приводять до узагальненого висновку про існування рівнів приведених швидкостей по газовій фазі, перевищувати які стає недоцільно і не вигідно, як технологічно, так і економічно.

Наявність вказаних обмежень за величинами вхідних теплових потоків і газових потоків, як енергоносіїв, привели до необхідності використання синергетичних впливів або до рішень на рівні дискретно-імпульсних технологій.

Підвищення тисків в паро-рідинних або рідинних середовищах дає можливість накопичення теплового енергетичного потенціалу, а потім за різкого зниження тиску одержати потужності переходів до нових станів рівноваги, які на кілька порядків переважають традиційні технології. Рівень суто механічного впливу на систему при цьому залежить саме від вказаної потужності. Енергетичні втрати в перетвореннях еквівалентні втратам з паровою фазою, яка залишає систему. Очевидно, що вони залежать від інтервалу витримки за знижених тисків.

В системах, в яких існує можливість швидкого нарощення тиску, такі енергетичні втрати будуть обмеженими і пропорційними температурному перепаду Δt , що спрацьовується.

Повторний механічний імпульс в системі буде супроводжувати нове різке підвищення тиску вже у результаті кавітаційних явищ на стадії колапсу газових, парогазових або парових бульбашок.

Власне під кавітацією розуміють утворення заповнених парою або газом каверн або бульбашок за локального зниження тиску в рідинній фазі до значень тисків насиченої пари. Співвідношення вмісту газу і пари в кавернах можуть бути різними. В залежності від вказаного співвідношення їх називають паровими або газовими. Важливо, що зниження тиску в рідинах до тисків насиченої пари можливе також при кипінні або вакуумуванні рідини. Але такі процеси розповсюджуються в рідинній фазі на весь її об'єм.

Розрізняють *гідродинамічну* кавітацію, викликану за рахунок місцевого зниження тиску в потоці рідини при обтіканні твердого тіла і *акустичну* кавітацію, що виникає завдяки проходженню через рідину акустичних коливань. В обох цих випадках мають місце швидкоплинні зміни тисків, які і провокують утворення каверн та їх колапс. Максимальне напруження розтягування, яке може витримати рідина:

$$p \approx 2\sigma/R,$$

де σ – поверхневий натяг рідини;

R – радіус бульбашки.

Теоретична і дійсна кавітаційна "міцність" рідин помітно відрізняються, що пояснюється існуванням *зародків кавітації* у вигляді різних домішок і включень та розчинених газів. Відповідно до теоретичних уявлень бульбашки з обмеженими розмірами повинні розчинятися в рідині, а більші – спливати. Виникнення фазових переходів завжди є ознакою відхилення системи від стану рівноваги, а перетворення рідинної фази у парову потребує подолання деякого потенціального бар'єру і енергетичних витрат. При цьому навіть за наявності метастабільного стану початок та інтенсивність фазових переходів пов'язують з наявністю центрів пароутворення. Відповідно до молекулярно-кінетичної теорії будови речовини у всякій гомогенній системі внаслідок хаотичних теплових переміщень молекул виникають флуктуації щільності. Величини таких флуктуацій можуть бути різними. Якщо вони знаходяться в межах, сумісних зі збереженням існуючого агрегатного стану системи, то остання перебуває в стані стійкої рівноваги, а її термодинамічний потенціал має мінімум і утворені флуктуації зникають, не змінюючи систему.

Зі зростанням величин флуктуацій термодинамічний потенціал системи підвищується і у метастабільному стані досягає максимуму. Наслідком таких змін буде утворення парових мікробульбашок, що означає внутрішній для системи перерозподіл енергії і перехід до нового стану рівноваги. В дослідженні [19] виникнення зародків кавітації пов'язується з впливами заряджених частинок високих енергій, які є складовими космічних променів. Стверджується, що внаслідок взаємодії μ -мезонів з електронами атомів речовин відбувається їх вибивання, утворюється енергія іонізації, за рахунок якої синтезуються парові бульбашки.

Більшість дослідників, які вивчали причини утворення каверн бульбашок, вважають, що зародками є бульбашки, заповнені парою і газом, адсорбовані на твердих домішках. Останні утримують на собі бульбашки, оскільки ізольовані в рідинній фазі вони є нестійкими. Такі висновки відповідають дослідом Харвея, Діна, Саберського. Так Харвей витримував воду в скляній трубці за високого гідростатичного тиску для розчинення газів, що в ній перебували. Внаслідок ліквідації центрів зародків цю воду нагрівали до температури 200°C без закипання. Утворення бульбашок також не мало місця при розповсюдженні у воді інтенсивних звукових хвиль високої частоти.

З аналізу літературних джерел, присвячених кавітаційним явищам, витікає, що за своєю фізичною основою рідинні середовища мають в собі передумови у вигляді центрів паро- і газоутворення. Очевидно, що з точки зору інтересів використання дискретно-імпульсних технологій більше значення має інформація щодо енергетичної бази утворення і перебігу кавітації, динаміки зміни розмірів парогазових бульбашок, частоти коливань, що виникають за таких деформацій тощо. Набір таких даних пов'язується з визначенням частоти зовнішніх впливів на газорідинні системи, часом існування парогазових бульбашок. У зв'язку з відміченим наведемо тут інформацію, яка стосується названих інтересів.

Стабільне існування парогазових бульбашок пояснюється тим, що на їх поверхні утворюються рівномірно розподілені заряди одного знака, що обумовлені іонами рідинної фази. Відштовхування цих зарядів попереджає колапс бульбашок. Умова рівноваги бульбашки в рідині при цьому записується у формі:

$$P_{\mu} = P_{\infty} - P_{\Pi} - P_e + 2\sigma/R,$$

де P_{∞} – статичний тиск в рідині, Па;

P_{Π} – тиск насиченої пари, Па;

P_e – тиск, викликаний силами кулонівського відштовхування, Па.

З умови розповсюдження в рідинній фазі гармонічних коливань без врахування P_e і дифузії газів через поверхню бульбашки і з врахуванням ізотермічного збільшення бульбашки з радіусом R рівняння рівноваги має вид:

$$P_0 - P_a = \left(P_{\infty} - P_{\Pi} + \frac{2\sigma}{R} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - \frac{2\sigma}{R_0} + R_{\Pi},$$

де P_0 – початковий тиск в бульбашці, Па P_a – акустичний тиск, Па;

R_0 – початковий радіус бульбашки, м.

Бульбашка зберігає стійкість, доки не досягається співвідношення $P_a > P_{кр}$, за якого бульбашка швидко збільшується і має місце розрив суцільності середовища. При цьому критичний радіус:

$$R_{кр} = \sqrt{3}R_0 \sqrt{\frac{R_0 P_\infty - P_{II} + \frac{2\sigma}{R_0}}{2\sigma}}.$$

У зв'язку з тим, що тиск насиченої пари значно менший за гідростатичний тиск, рівняння кавітаційної міцності записується у формі:

$$R_0^3 + R_0^2 \frac{2\sigma}{R_0} - \frac{32\sigma^3}{27P(P_\infty - P_{кр})^2} \cong 0.$$

Для заданих змінних тисків і частот звукового поля існують мінімальний і максимальний радіуси бульбашок, здатних викликати кавітацію. Мінімальний радіус визначається з рівнянь, а максимальний відповідає резонансному радіусу, який визначається за формулою Міннерта [19]:

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_p} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho} \left(P_\infty + \frac{2\sigma}{R_p} \right)},$$

де $\gamma = c_p/c_v$ – співвідношення питомих теплоємкостей для газу і пари в бульбашці.

Формула (1.6) відповідає гармонічним коливанням за обмежених амплітуд, низьких частот звукового поля і порівняно великих бульбашок.

Для високих частот і з врахуванням наявності фазових переходів Хабеєв запропонував таку формулу [19]:

$$R_p^4 = \frac{\sigma^2}{\pi A_p^2 f^2},$$

де A_p – функція, що залежить від теплоти пароутворення, щільності, теплопровідності і температури рідини.

Нелінійне диференціальне рівняння моделі сферично-симетричної пульсації газової каверни радіусом $r = R(t)$ в полі плоскої звукової хвилі:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} [P_\infty - P(R)] = 0.$$

Аналітичне розв'язання останнього рівняння отримано Релеем за умов $P_{\infty} = P_a$ і $P(R) = 0$, яке власне є рівнянням колапсу бульбашки під дією гідростатичного тиску:

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{P_{\infty}}{\rho} \left(\frac{R_{\max}^3}{R^3} - 1\right).$$

Звідси час здійснення колапсу:

$$t_k = 0,915 R_{\max} \sqrt{\rho/P_{\infty}}.$$

Рівняння, що стосується змін радіуса кавітаційної каверни в зоні ультразвукової хвилі:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + \frac{1}{\rho} \left[P_{\infty} - P_{\Pi} - P_a \sin \omega t + \right. \\ \left. + \frac{2\sigma}{R} - \left(P_{\infty} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] = 0.$$

Недоліком останньої умови є те, що в якості передумови в нього вкладено припущення про нестискуваність рідини. Останнє не дозволяє оцінити кінцеву стадію колапсу. Такого недоліку не має рівняння Херрінга-Флінна, але воно не є адекватним за швидкостей колапсу, близьких до швидкостей звуку c_0 :

$$R \left(1 - 2 \frac{dR/dt}{c_0} \right) \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{dR/dt}{c_0} \right) \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \\ + \frac{1}{\rho} \left[\frac{2\sigma}{R} + P_{\infty} - P_{\Pi} - P_a \sin \omega t + \frac{4\mu dR/dt}{R} - \left(P_{\infty} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] + \\ + \frac{R}{\rho} \cdot \frac{dR}{dt} \left(1 - \frac{dR}{c_0} \right) \frac{dP(R)}{dR} = 0.$$

У рівнянні Кірвуда-Бете введено припущення про сферичність хвиль з кінцевою амплітудою, що утворюються на останній стадії колапсу каверни:

$$R \left(1 - \frac{dR/dt}{c_0} \right) \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{dR/dt}{3c_0} \right) \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \left(1 + \frac{dR/dt}{c_0} \right) H - \frac{dR/dt}{c_0} \left(1 - \frac{dR/dt}{c_0} \right) R \frac{dH}{dR} = 0,$$

де

$$H = \int_{P_\infty}^{P(R)} \frac{dP}{\rho} = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{A^n}{\rho} \times \left\{ \left[\left(P_\infty + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} + B \right]^{\frac{n-1}{n}} - (P_\infty - P_a \sin \omega t + B)^{\frac{n-1}{n}} \right\};$$

A , B та n – сталі коефіцієнти. Для води $A = 300$ МПа, $B = 300$ МПа і $n = 7$.

Рівняння не мають загальних розв'язань. Їх часткове дослідження показало, що за амплітуд звукового тиску $P_a < P_{кр}$ газові бульбашки не колапсують і пульсують лінійно. Бульбашки з $R < R_p$ пульсують з частотою акустичної хвилі, а за умови $R > R_p$ період пульсацій близький за періодом до власних коливань. При $P_a > P_{кр}$ рух каверни стає нестійким і вона колапсує в першому додатному напівперіоді. За подальшого зростання P_a інерційні сили протидіють колапсу і бульбашка виконує одне або кілька коливань, а потім колапсує. Наведені результати добре узгоджуються з експериментом [19].

Від початку зародження бульбашки збільшення її відбувається за рахунок зниження тиску в рідинній фазі до $P_{кр}$, яке менше за тиск насиченої пари. Проте в полі коливальних процесів має збільшення не лише розмірів, а і маси газу в бульбашці. У фазі стискання масовий потік має напрямок з бульбашки в рідинну фазу, а за розширення напрямок матеріального потоку змінюється за рахунок дифузії. Оскільки кількісний дифузійний потік пропорційний площі поверхні, то за нелінійних пульсацій потік при розширенні перевищує потік при стисканні. Наслідком такої нерівності є зростання розмірів бульбашки. Відбувається як би «спрямлення» знакозмінного потоку і це явище отримало назву спрямленої газової дифузії.

Зростання парових бульбашок за періодичних пульсацій, що генеруються зовнішнім полем, також обумовлюється явищем, що отримало назву спрямленого теплопередавання або спрямленого теплоперенесення. Цей ефект є аналогічним спрямленій газовій дифузії.

За розрідження акустичного поля температура фази в бульбашці знижується і тепловий потік спрямовується від рідинної фази в газу через більшу поверхню. Але за стискання температура в бульбашці зростає і тепловий потік отримує протилежний напрямок, тобто в сторону рідинної фази за відносно меншої поверхні. В середньому за цикл проявляється нелінійний ефект спрямованого теплового потоку від рідини до бульбашки. Окрім того парова бульбашка за пульсацій поглинає енергію зовнішнього поля, яка витрачається на випаровування рідини і супроводжується додатковим зростанням її об'єму.

За звичайних умов не виникають виключно газові або виключно парові бульбашки, а в них мають місце суміші пари і газів.

Протидіють зростанню бульбашок такі фактори, як приєднана маса рідини, статичний тиск і тиск поверхневого натягу. Саме співвідношення факторів зростання і обмеження визначає кінцевий результат. Нелінійність кривої фазової рівноваги приводить до того, що в середньому температура бульбашки знижується, що генерує потік теплової енергії в бульбашку, випаровування рідини і зростання бульбашки за період в цілому.

За припущення, що паро-газова суміш в реальній кавітаційній бульбашці за адіабатного стискання відповідає ідеальному газу, тиск на момент колапсу визначається параметром газовмісту α :

$$P_{\max} \cong \frac{P_{\infty}}{81\alpha^3}.$$

За розширення кавітаційної бульбашки в рідинній фазі генерується сферична хвиля. Без врахування в'язкості і теплопровідності тиск у хвилі визначається за формулою Джилмора:

$$P(r, t) = \frac{R}{r}(P(R) - P_{\infty}) + \frac{R}{r} \left(1 - \frac{R^3}{r^3}\right) \frac{1}{2} \rho \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + \frac{r}{c_0} \frac{dR}{dt} \left(1 - \frac{R}{r}\right) \left[\rho \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 - 2 \left(P(R) - P_{\infty} - R \frac{dP(R)}{dR} \right) \right].$$

За дуже значних швидкостей колапсу хвиля може перейти в ударну, тиск в якій змінюється обернено пропорційно відстані до каверни [19]. Відстань, на якій утворюється ударна хвиля, визначається значенням максимального тиску в каверні і відповідає співвідношенню:

$$P_{\max} > 13,6 \left(\lg \frac{r}{R_{\min}} \right)^{-\frac{2}{3}},$$

де P_{\max} складає сотні мегапаскалів.

Динаміка парогазових каверн з врахуванням теплообміну і частково динаміки газу в бульбашці вивчалася в роботах Маргуліса [14, 19]. В опису динаміки бульбашки використовувалося рівняння, а швидкість газу $v_r(R, t)$ в бульбашці визначалася з умови нерозривності. Маса газу в бульбашці радіусом R вважалася сталою. Тоді тиск в бульбашці дорівнює:

$$P(t) = \frac{R_0^3 P_\infty}{3T_0} \left(\int_0^{R_0} \frac{R_i^2}{T(R_i, t)} dR_i \right)^{-1},$$

де $0 < R_i < R_0$.

Рівняння теплопровідності для газу в бульбашці має вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho_r c_{pr}} \operatorname{div}(\lambda_r \operatorname{grad} T) - \bar{V}_r \operatorname{grad} T + \frac{1}{\rho_r c_{pr}} \cdot \frac{dP}{dt},$$

де

$$\rho_r c_{pr} = \frac{P(t)}{T(R_i, t)} \cdot \frac{\gamma}{\gamma - 1}.$$

За результатами розв'язання і аналізу останніх двох рівнянь зроблено висновок, про те, що теплообмін в процесах колапсу є вагомим і таким, що помітно знижує параметри парогазової суміші: швидкість і температуру більше ніж у 2 рази, а тиск – більше ніж на порядок порівняно з адіабатним колапсом. При цьому час колапсу близький до релеевського.

Мінімальний радіус бульбашки R_{\min} і радіус R_c , за якого досягається максимальна швидкість, за врахування теплообміну майже вдвічі перевищують відповідні величини адіабатного процесу. Максимальна швидкість руху стінок бульбашки при цьому (не більше 600 м/с) значно менша за швидкість звуку в рідині ($c_0 \approx 1500$ м/с).

Більшість досліджень стосуються одиначної бульбашки, проте реалізувати на практиці таку ситуацію практично неможливо. Навіть за тисків, що не набагато перевищують поріг кавітації, відразу з'являються *кавітаційні кластери*, форма і спектри яких визначаються початковим спектром розмірів кавітаційних зародків, характером створюваного напруження і граничними умовами. Всі зародки досягають максимального розміру одночасно і середовище може вважатися цілком монодисперсним, яке складається з бульбашок одного розміру.

У зоні кластерів кількість кавітаційних бульбашок перевищує кількість зародків приблизно у 10^5 разів. Це пояснюється ланцюговою реакцією утворення бульбашок. За кавітаційного колапсу бульбашка може розпадатися на окремі частини з високими параметрами, які на наступній фазі розширення самі легко стають новими зародками.

В кавітаційній зоні має місце безперервний процес розмноження і коаліценсії кавітаційних бульбашок, причому кавітаційний поріг помітно зменшується, оскільки в усталених режимах роль кавітаційних зародків починають виконувати рівноважні бульбашки, об'єм і газовміст яких більші, ніж у зародків.

Рівень розвитку кавітації визначають так званим *індексом кавітації*:

$$K = \Delta v / v ,$$

де v – загальний виділений об'єм;

Δv – об'єм бульбашок кластера.

Важливо, що індекс кавітації є мірою просторової щільності енергії, а величина Δv пропорційна потенціальній енергії бульбашок. Робота, що виконується n бульбашками з однаковими максимальними розмірами визначається рівнянням у формі:

$$A_K \approx \frac{4}{3} \pi R_{\max}^3 P_{\infty} n = P_{\infty} \Delta v .$$

Для усталеного режиму за незмінних зовнішніх умов (статичний тиск, температура, газовміст тощо) індекс кавітації є функцією координат поля. Визначаючи K в граничному випадку як функцію точки, можливо ввести поняття середнього індексу кавітації $\langle K \rangle$ у формі:

$$\langle K \rangle = \frac{1}{v} \int_v K dv .$$

Величина K знаходиться в межах $0 < K < 1$. Нижня межа відповідає відсутності кавітації, а верхня є досяжною лише в локальній зоні. Величина ентальпії H кавітаційних бульбашок пов'язана з індексом кавітації:

$$H = \mu K,$$

де μ – хімічний потенціал пари в одиниці об'єму.

Наведені залежності стосуються енергетичних показників кавітаційних процесів. Очевидно, що джерелом при цьому має виступати зовнішній регулярний або нерегулярний вплив, або має відбуватися енергетична трансформація самого джерела. В останньому випадку вирішальне значення має тепловий енергетичний потенціал середовища, його температура та тиск. Саме зміна останнього визначає глибину входження в метастабільні стани. З точки зору інтересів харчових і мікробіологічних технологій, які використовують термолабільні середовища або відповідні компоненти в них, важливо, що реалізація кавітаційних явищ і впливів цілком можлива за обмежених температур і тисків, менших за атмосферний. Маючи обмеження величин температур і тисків в умовах вакуумних технологій, разом з тим цілком зберігаються всі наслідки кавітаційних ефектів, які стосуються подрібнення, екстракції, розчинення, емульгування, кристалізації, фазових переходів тощо. При цьому важливо те, що енергетичне підґрунтя у більшості випадків належить самому середовищу у двох формах. Перша з них належить тепловому потенціалу, а друга – потенціалу розчиненого газу. Щодо останнього, то використання розчиненого газу, як робочого агента, запропоновано під назвою «технологій різкої зміни тисків» (ТРЗТ) [19]. В якості робочого агента запропоновано до використання діоксид вуглецю, який порівняно з азотом і киснем повітря має помітно більшу розчинність і є практично інертним до харчових середовищ. Окрім того в процесах бродіння і вирощування мікроорганізмів (аеробних і анаеробних) CO_2 синтезується і насичує рідинні середовища, створюючи в них додатковий енергетичний потенціал. При цьому, наприклад, цілком можливо процеси бродіння здійснювати за тисків, які перевищують атмосферний, і таке перевищення з точки зору інтересів мікробіології може бути достатньо значним.

Разом з тим, різке зниження тиску в газонасиченому середовищі приводить до утворення масивів газових бульбашок на рівні кавітаційних кластерів у теплотехнологіях з подібними до останніх наслідками. Рівень енергетичного потенціалу, який при цьому визначає потужність трансформації

потенціальної енергії у енергію кавітаційних явищ, визначається глибиною входження у метастабільні стани, що відображується значеннями сталих насичення c_n у початковому і кінцевому станах. Підрахунки показують, що потужності енергетичних перетворень в питомому обчисленні сягають кількох кВт на літр середовища, що відповідає аналогічним показникам в дискретно-імпульсних теплотехнологіях і наближається до надвисокоочастотних електромагнітних методів оброблювання. Запропоновано [19] методи ТРЗТ ввести до складу технологій по переробці сировини відносно високого вологовмісту. При цьому важливе значення має те, що їх застосування не потребує підвищення температур, як в теплотехнологіях. Цю ж перевагу зберігають за собою і вакуумні технології. Окрім того пропонується об'єднання ТРЗТ і вакуумних технологій, що знайшло своє відображення в технологіях промислового рівня і має патентний захист [19].

За випадків бродильних анаеробних процесів і навіть за аеробних процесів вирощування мікроорганізмів, дріжджів тощо відбувається синтез діоксиду вуглецю, концентрація якого в розчиненому стані визначається у відповідності до закону Генрі тиском в культуральному середовищі і температурою.

Звичайно в технологічних апаратах обирається певний рівень тиску. В процесах виробництва пивного суслу, вина, етанолу тощо цілком можливо і доцільно зброджувати за тисків, більших за атмосферні, що дає можливість обмежувати мікробіологічне забруднення середовищ.

Тим більше це стосується мікробіологічних виробництв. Але при цьому задається верхня межа тисків, за якої здійснюється спрацювання запобіжних клапанів на відкривання, за якого певним чином має місце наближення до ТРЗТ. Очевидно, що при цьому на динаміку перехідного процесу десатурації впливають співвідношення об'ємів рідинного (або газорідинного) середовищ і газової фази, характеристики перепускних клапанів, фізико-хімічні характеристики середовищ тощо. Температурні режими при цьому призначаються в інтересах технології з врахуванням характеристик мікроорганізмів.

Зниження тисків в апаратах також здійснюється до певного рівня, від якого поновлюється їх герметизація і поступовий процес оновленого накопичення CO_2 . На користь такого режиму спрацьовує поступове виділення утвореної газової фази і зростання тиску.

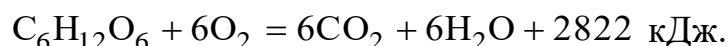
Таким чином, в названих процесах має місце кавітаційне утворення бульбашок CO_2 , однак друга фаза – схлопування або колапс практично

відсутня, що очевидно знижує результативність масообміну. Окрім того практично незворотно втрачається потенціальна енергія стиснутої газової фази над середовищем.

Джерелом утворення потенціальної енергії розчиненого газу і газу в надрідинному об'ємі є енергія хімічних зв'язків живильних компонентів. Так щодо процесу бродіння маємо:



а в аеробних процесах повне окислення глюкози проходить відповідно до умови:



У відповідності до рівнянь (8.23) і (8.24) відповідно переробка 100 кг цукру приводить до утворення 48,89 та 146,67 кг CO_2 .

Утворюється діоксид вуглецю в середині мікробних клітин і через їх цитоплазматичну та клітинну оболонки дифундує в рідинне середовище. При цьому за умови кавітаційного утворення бульбашок тиск в них дорівнює гідростатичному у відповідній координаті середовища. В перерахунку на нормальні умови об'єми CO_2 відповідно складають:

$$V_{CO_2} = \frac{48,89}{\rho_{CO_2}} = 24,69 \text{ м}^3; \quad V_{CO_2} = \frac{146,67}{1,98} = 74,08 \text{ м}^3.$$

Таке газовиділення за тиску 0,2 МПа відповідає потенціальній енергії 9778 та 14816 кДж.

В товарних апаратах для вирощування хлібопекарських дріжджів об'ємом 70 м³ за приросту 17% переробляється до 500 кг цукру, що відповідає потенціальній енергії:

$$E = 14816 \frac{P}{0,2 \cdot 100} \cdot 500,$$

де P – середній гідростатичний тиск в культуральному середовищі, МПа.

За безперервного процесу і безперервного виведення CO_2 , що відповідає утворенню бульбашок середня потужність визначається так:

$$N = 14816 \frac{P}{0,2 \cdot 3600} \cdot 5,0 = 18,52 \text{ кВт.}$$

Одержане значення потужності стосується саме кавітаційного утворення бульбашок CO_2 і є помітним поповненням енергетичного балансу, оскільки воно складає біля 37% від енерговведення в середовище від газового потоку (50 кВт). Однак в літературних джерелах відсутня інформація про спроби використання цього енергетичного потенціалу, хоча його технологічна цінність є високою у зв'язку з кавітаційними впливами у повних об'ємах середовищ. Вирішення цієї проблеми можливо шукати на шляху апаратурного оформлення бродильних реакторів, устаткованих ресиверами-регуляторами, з'єднаними з газовими об'ємами апаратів, які б дозволяли регулювати глибину і час входження середовищ у метастабільні стани.

3.7. Особливості зброджування середовищ при виробництві бульбашок

Завданням цієї обробки у виробництві хлібобулочних виробів є досягнення розпушування тіста для утворення його пористої структури. Такий процес здійснюється біохімічним, механічним або хімічним способами [8].

За використання біохімічного методу передбачається застосування пресованих або сушених хлібопекарських дріжджів, дріжджового молока, а також рідких дріжджів і дріжджових заквасок [7, 9]. Житнє тісто готується на спеціальних заквасках, що містять гомо- і гетероферментативні мезофільні молочнокислі бактерії та кислотостійкі раси дріжджів [5, 6].

Утворення діоксиду вуглецю і спирту за зброджування цукрів дріжджами і деякими видами молочнокислих бактерій забезпечує розпушення тіста біохімічним способом [62]. З цієї точки зору важливими є наслідки синтезу діоксиду вуглецю. Він частково розчиняється в рідкій фазі тіста, але в основному затримується клейковинними плівками тіста і надає йому пористої структури [63–65].

Тривалість розпушення тіста біохімічним способом складає від 1 до 5 годин. Важливо, що за цей час у тісті накопичуються смакові та ароматичні речовини, формуються реологічні властивості, які визначають якість виробів [66, 67].

Певною альтернативою біохімічному способу виступає механічний спосіб розпушення тіста, за якого діоксид вуглецю, кисень або повітря під тиском або за розрідження подаються у герметично закриту тістомісильну

машину [45, 68, 69]. Хоча цей спосіб не знайшов широкого застосування проте подальші заходи по удосконаленню цієї технології є багатообіцяючим [70].

Хімічний спосіб передбачає розпушення тіста під дією діоксиду вуглецю та аміаку, що виділяється при розкладанні хімічних розпушувачів. Цей спосіб застосовується у виробництві печива, пряників і кондитерських виробів, що містять значну кількість жирів і цукру, коли неможливо застосувати хлібопекарські дріжджі [71].

Для хімічного розпушування використовують натрій гідроген карбонат NaHCO_3 , амоній карбонат $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ або їх суміш. Відповідно до цих застосувань мають місце формули:



Хоча механічний і хімічний способи є економічніші, ніж біохімічний, однак вони поступаються у смакових якостях, мають помітно гірший стан м'якушки і менший об'єм. Лише при біохімічному методі бродіння накопичуються продукти бродіння, які формують смак і аромат виробів, утворюється розпушена еластична м'якушка.

Хлібопекарські дріжджі зброджують всі основні цукри тіста: глюкозу, фруктозу, сахарозу і мальтозу після розкладання двох останніх на моносахариди. Сахароза під дією ферменту сахарози трансформується на глюкозу і фруктозу, а мальтоза під дією ферменту мальтази перетворюється на дві молекули глюкози.

Після замішування тіста протягом 1...1,5 годин досягається зброджування власних цукрів борошна, а подальша життєдіяльність дріжджів пов'язана зі станом вуглеводно-амілазного і білково-протеїназного комплексу борошна. ними забезпечується ферментативний гідроліз крохмалю, в тісті синтезується мальтоза, яка є основною речовиною живлення дріжджів.

Динаміка зброджування цукрів визначає динаміку газоутворення. очевидно, що на неї впливає рецептура середовища і за показником синтезу CO_2 за інших рівних умов це добре відображується в графічній інтерпретації (рис. 3.9).

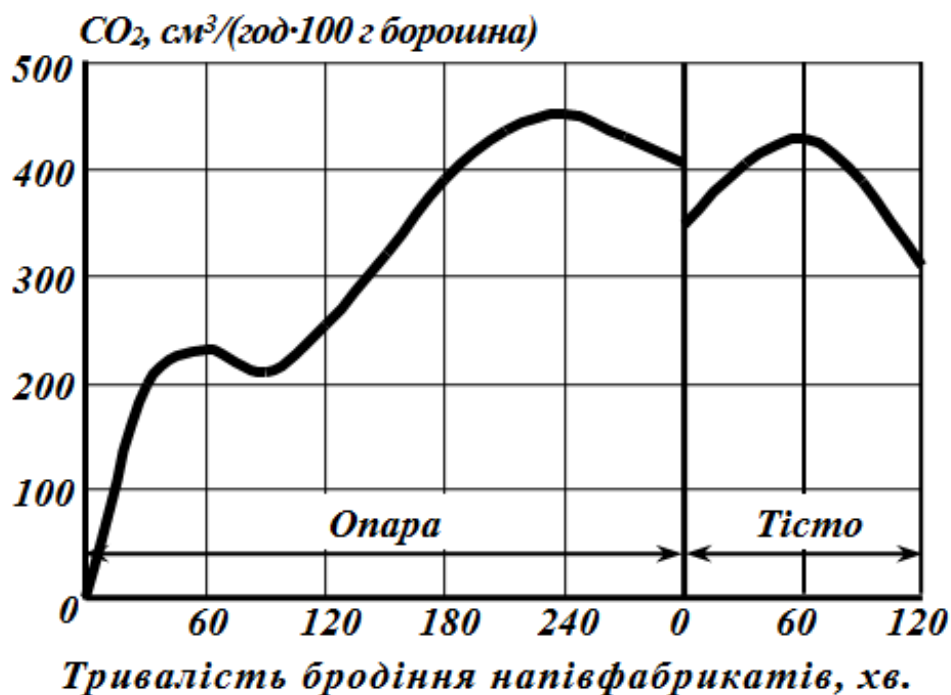


Рис. 3.9. Інтенсивність газоутворення під час бродіння опари і тіста

Причиною такої складної залежності і присутності екстремумів є постійні зміни концентрацій речовин, їх трансформації тощо, до яких додаються змінні значення тисків. звідси відчутний вплив рецептури, внесення осмоактивних речовин, поява етанолу, адаптація дріжджів до нових умов.

За час дозрівання тіста його маса зменшується на 1,5...3,5% за рахунок часткового випаровування, але, в основному, за втрат сухих речовин на бродіння.

В оточуюче середовище виділяється певна частина діоксиду вуглецю, спирту та летких кислот, за кількістю CO₂ і C₂H₅OH, що утворилися, можливо визначатися з загальними втратами сухих речовин.

Вважається, що за технологій роботи на густих опарах втрати СР близькі до 3,0...3,3, а на рідких – 2,5...2,8%.

Значна кількість речовин в середовищі, зміна їх концентрацій, взаємодії між ними і мікроорганізмами, присутність стимуляторів тощо приводять до відносної нестабільності системи. За таких умов існує розуміння того, в якому напрямку слід оцінювати впливи окремих факторів. З першого погляду може здатися, що найкращому випадку має відповідати максимальне задоволення або забезпечення на верхніх рівнях факторів впливу. Проте негативні наслідки також слід програмувати, наприклад, за величинами осмотичних тисків, подвійних і потрійних впливів факторів, погіршення якісних показників

продукції тощо. Оцінювати впливи композицій факторів тим більш складно. Наприклад, результатів трансформацій фізичних факторів визначених з цієї точки зору недостатньо. Якщо вплив температури ретельно відслідковано, то відносно фізичного тиску завершеної точки зору не існує [58]. Проте положення термодинаміки тісно пов'язують параметри тиску і температури, наприклад, в газових законах, рівнянні Менделєєва-Клайперона, законі Генрі тощо. З точки зору технічної доступності у впливах на зброджувані тістові масиви інтерес мають, наприклад, адіабатні або політропні процеси [23, 38]. У зв'язку зі стисканням системи, якою є зброджуваний тістовий масив, підвищується температура газової фази. Очевидно, що до стискання системи температури газової фази і тіста співпадають. Однак після стискання отримуємо співвідношення температур:
в адіабатному процесі

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

і у політропному –

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

де T_1 і T_2 – відповідно початкова і кінцева температура газової фази;

P_1 і P_2 – відповідно початковий та кінцевий тиск;

k і m – показники адіабати і політропи.

Енергія, що вводиться в систему за таких умов [38], дорівнює

$$L = \frac{MR}{k-1} (T_2 - T_1),$$

де M – маса стискуваного газу;

R – універсальна газова стала.

Введена таким чином енергія має перерозподілитися між диспергованою газовою фазою і тістом і загальна температура системи зростає.

У відповідності до закону Генрі зростання парціального (а у нашому

випадку загального) тиску підвищує розчинність газу в рідинній фазі середовища, а збільшення температури розчинність зменшує:

$$c_H = k p,$$

де k – константа Генрі.

Цей показник враховує як коефіцієнт пропорційності вплив температури та фізико-хімічні властивості складових системи. збільшення температури розчинність c_H зменшує (рис. 3.10).

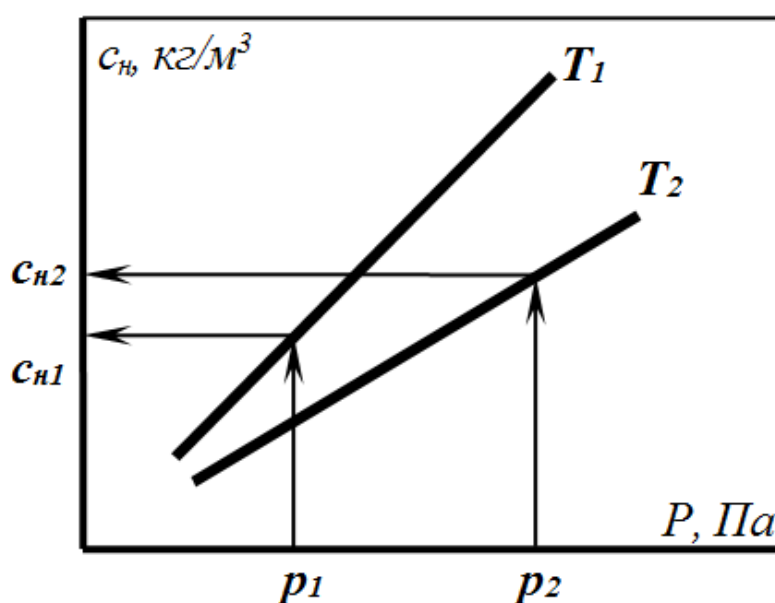


Рис. 3.10. Графік залежності між параметрами c_H та P у відповідності до закону Генрі

На графіку заведені ізотерми T_1 та T_2 і очевидно, що теоретично можливими є варіанти, за яких розчинність зростає, знижується або залишається сталою зі змінами тиску. Разом з тим температура середовища у відповідності до закону Вант-Гоффа впливає на осмотичний тиск розчину:

$$\pi = CRT,$$

де π – осмотичний тиск розчину, кПа;

C – мольнооб'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):

$$C = n/V,$$

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

$$C = \frac{m}{MV}$$

та рівняння Вант-Гоффа:

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

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

Таким чином, вторинним наслідком зміни тисків у зброджуваній системі є зміна температур диспергованої газової фази, введення додаткової енергії в систему, зміни осмотичних тисків. Первинним же наслідком зміни тиску в середовищі є активне перемішування тіста. Його перебіг відбувається в умовах об'ємного напруженого стану за рахунок стискання або розширення газової фази. При цьому 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 у механічну потенціальну і одночасно кінетичну енергію зміни форм і розмірів.

Перехідний процес активного газоутворення означає зростання габаритних 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 фактором потенціальної енергії газової фази.

Однак за використання технологій зміни зовнішніх для системи тисків перебіг таких швидкоплинних процесів може бути достатньо швидкоплинним,

рівно як в широкому діапазоні може бути частота імпульсів. При цьому, очевидно, має місце поєднання двох процесів, оскільки до імпульсного перемішування додається зброджування цукрів середовища. наслідком такого поєднання є інтенсифікація масообмінних і біохімічних процесів. Для підтвердження такого очікування звернемося до аналізу утворення тіста.

Початковими умовами такого процесу є дотримання рецептури компонентів. Вважається [58], що замішування тіста здійснюється в частинах, які можуть бути представлені трьома стадіями. На першій сировина механічно змішується і зволожується. На другій відбувається набухання біополімерів, їх злипання, утворення тістової маси. На третій стадії тістова маса пластифікується, внаслідок чого набуває пластичності, пружності та еластичності [72–74].

До числа біополімерів, які беруть участь в утворенні тіста, відносяться білки, крохмаль, пентозани, а також оболонкові частини. У процесі перемішування компонентів тіста відбувається складні колоїдні, фізико-хімічні та біохімічні перетворення під дією води і ферментних систем.

З числа наведених найбільш активно протікають колоїдні процеси. В результаті поглинання води білки, крохмаль та пентозани збільшуються в об'ємі, а цукри, мінеральні та водорозчинні речовини та вітаміни переходять у розчин. В утворенні пшеничного тіста першорядна роль належить білкам, які поглинають подвоєну кількість води порівняно зі своєю масою. Осмотично зв'язана волога в них складає 75% і абсорбційно зв'язана – 25%. Саме за рахунок осмотично зв'язаної вологи білкова молекула розпушується та збільшується в об'ємі.

Під час замішування тіста внаслідок механічної дії набухлі, збільшені в об'ємі водонерозчинні білкові речовини (клейковинні білки) утворюють тривимірну губчасто-сітчасту неперервну структуру. Її називають клейковинним каркасом. Саме він визначає еластичні та пружні властивості тіста. До складу каркасу входять зерна крохмалю, нерозчинні пентозани, частинки оболонки зерна. Мікроструктуру зерна наведено на рис. 3.11.

Процеси гідратації компонентів середовища відбуваються з різною швидкістю і залежать від температури води. Максимальне набухання білків відбувається за температури 30°C з водопоглиненням 2,0...2,5 г/г. При вищій температурі набухання білків обмежується. Водопоглинення крохмалю становить 0,3...0,4 г/г води на суху речовину.

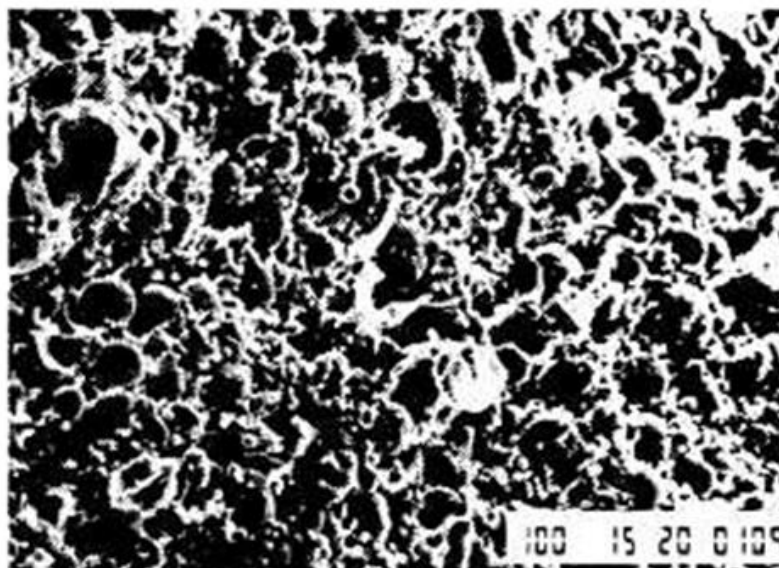


Рис. 3.11. Мікроструктура тіста: біла сітка – клейковинний каркас; темні овальні вкраплення – крохмальні зерна ($\times 500$)

Пентозани поглинають воду осмотично і утворюють в'язкі розчини, наслідком чого є значне підвищення вологопоглинальної здатності тіста і зміцнення його консистенції.

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

Стосовно утвореного замішуванням борошна з водою розрізняють три фази: тверду, рідку та газоподібну.

Тверда фаза створюється нерозчинними білками, що утворюють клейковинний каркас і забезпечують його розтягуність та еластичність.

Рідка фаза є в'язким розчином, який складається зі зв'язаної адсорбційно складовими борошна води.

Газоподібна фаза утворюється внаслідок насичення тіста кількома повітря під час замішування та за рахунок бродіння і частково внесенням повітря борошном і водою. Вважається, що в загальному об'ємі середовища газова фаза близька до 10%.

Вказана комбінація з трьох фаз забезпечує можливість перебігу біохімічних процесів. При цьому тверда і рідинна фази виступають в ролі компонентів, що несуть в собі живлення мікроорганізмам. Окрім того масообмін в системі живлення можливий лише в рідинній фазі.

Механічне перемішування системи не тільки інтенсифікує бродіння, а і

покращує структурно-механічні властивості тіста. Така операція має назву обминання. В існуючих технологіях процес обминання є коротким і складає 1,5...2,5 хв. При цьому досягається видалення надто великих каверн CO₂, відбувається перерозподіл в тісті мікробних клітин після їх брунькування, має місце перебудова клейковинного каркасу з утворенням дрібнішої білкової сітки. У результаті перемішування тісто досягає більшого об'єму, покращується його газо- і формоутримувальна здатність. Таке перемішування здійснюють один або два рази і при цьому значення мають частота і амплітуда силових впливів.

Наведена частина аналізу стосовно приготування і особливостей бродіння тіста однозначно приводить до висновку про можливість і доцільність застосування імпульсних впливів. Останні можуть застосовуватися безпосередньо під час бродіння, або замість традиційних операцій обминання, або їх доповнення.

Імпульсні впливи можуть стосуватися різних діапазонів тисків в процесі обробки, однак існує логіка вибору у зв'язку з кінцевим очікуваним результатом.

Припустимо, що обраною технологією передбачається обмеження втрат сухих речовин за умови рівня розпушування тіста і за досягнення достатньої газоутримувальної здатності, необхідних для забезпечення газо- та формоутворювальної здатності реологічних властивостей, а також продуктів спиртового і молочнокислого бродіння, що обумовлюють смак і аромат хліба. Однак, об'єктивних методів контролю готовності тіста за цими показниками не існує. На практиці готовність тіста визначають за його титрованою кислотністю, а також за органолептичними ознаками: висотою підйому, пружністю, розпушеністю, сильним спиртовим запахом, терміном бродіння.

Проте визначення пружно-в'язко-пластичних властивостей тіста в динаміці їх змін забезпечені більш повно. Використовують екстенсограф Брабендера, альвеограф Шопена, фаринограф або валориграф, реотест.

На основі феноменологічних міркувань і з врахуванням викладеного аналізу приходимо до висновку, що для розв'язання поставленої задачі доцільно замішування тіста, дозрівання, бродіння та обминання здійснювати за тисків, більших за атмосферні, що за подальших процесів з переходом до атмосферних тисків приводить до різкого збільшення газоутримувальної здатності середовища.

По кожній зі схем визначені показники вологості температури, умов адаптації дріжджів до життєдіяльності в анаеробних умовах борошняного

середовища, активації їх розмноження, гідратації і ферментативного гідролізу біополімерів борошна, накопичення кислот, водорозчинних і ароматичних сполук. Початкові умови бродіння характеризуються значеннями $28 \pm 2^\circ\text{C}$, а за умов бродіння – $30 \pm 2^\circ\text{C}$. На завершення бродіння об'єм опари зменшується, тоді як на момент завершення тіста його об'єм збільшується у 1,5...2 рази. Важливе значення має ретельність змішування опари з борошном, водою, сіллю, додатковою сировиною, які машинним способом місять 7–8 хв.

Обминанням тіста з нього частково видаляється діоксид вуглецю та інші продукти бродіння. При цьому покращуються умови життєдіяльності дріжджів, підвищується їх бродильна активність, еластичність середовища.

Обминання конче потрібне у разі переробки сильного борошна, а також борошна з короткорваною клейковиною.

Разом з тим стосовно названих технологій доцільно застосовувати такі заходи:

- збільшувати кількість дріжджів на заміс тіста; проводити активацію дріжджів, використовувати пресовані дріжджі разом з рідкими (1,5...2% пресованих і 10...20% рідких);
- добавляти під час замішування мезофільні пшеничні закваски (8...10% до маси борошна);
- вносити органічні кислоти;
- додавати частину тіста попереднього приготування;
- вводити молочну сироватку;
- використовувати інтенсивний або подовжений заміс тіста;
- підвищувати початкову температуру бродіння на 2...3°C.

У разі таких заходів тривалість дозрівання тіста скорочується на 30 хв.

Названі заходи щодо технологій приготування тіста і тістових заготовок є основою структурно-механічних властивостей, пружно-еластичних та в'язко-пластичних характеристик тіста. Останні впливають на формостійкість заготовок при вистоюванні та випіканні та визначають об'ємний вихід виробів і якість структури м'якушки [75]. Формування зазначених властивостей тіста і виробів залежить від багатьох факторів, в основному від співвідношення полімерів борошна, стану його білково-протеїназного комплексу та від рецептури тіста.

Так суха пшенична клейковина (СПК) містить білки, водорозчинні речовини, крохмаль, які відіграють певну роль у формуванні структурно-механічних властивостей тіста. ФП Нейтраза 1,5 МГ та аскорбінова кислота безпосередньо впливають на стан клейковинного каркасу, від якого найбільше залежать структурно-механічні властивості тіста.

У роботі [7] виконано дослідження по оцінці впливів добавок поліпшуючої дії на пружно-еластичні характеристики тіста.

Сучасна теоретична концепція розглядає тісто як твердо-рідке тіло, що поєднує у собі пружно-еластичні та в'язко-пластичні властивості. Цій структурі відповідають певний стан і склад полімерів крохмалю, білків, клітковини, які гід ратуються в присутності води та утворюють колоїдну систему, а також вміст низькомолекулярних сполук, цукрів, жирів, що пластифікують цю систему [76, 77].

Пружність тіла гальмує зростання об'єму, але у вже сформованих заготовках вона сприяє збереженню їх форми. Очевидно, що склад тіста і присутність поліпшувачів приводять до результатів, які пояснюють реакцію системи на їх присутність. Однак важливий напрямок фізичного впливу, пов'язаний з загальним газо вмістом і принципово з розподілом диспергованої газової фази залишається практично без уваги дослідників. При цьому можливо стверджувати, що машинне вимішування тіста супроводжується макровпливами, які забезпечують номінальні інтереси [72–74], однак, на думку автора цього дослідження, існує можливість впливів на систему в наближенні до мікрорівнів за рахунок імпульсних енергетичних впливів на результат енергетичних трансформацій у формі диспергованої газової фази. Зусилля, спрямовані на створення фізичної моделі бродіння тістових масивів можуть завершитися пропозиціями щодо організації поглибленого і цілеспрямованого впливу до зон енерго- і масообміну на мікрорівнях. Присутність навіть первинної газової фази вже забезпечує пружні властивості середовища, що можуть зростати за рахунок зовнішніх енергетичних імпульсних впливів, які переводять систему від простих до об'ємних напружених станів зі збільшенням газотримувальної здатності. При цьому динаміка утворення, трансформацій і відносних переміщень потребує додаткового обґрунтування.

Синтез газової фази у своєму розвитку вже утворених каверн і з появою нових супроводжується протидією двох факторів. Перший з них – це протидія гравітаційного поля у формі гідростатичного тиску, а другий стосується протидії формозміни середовища.

Хоча у цьому сполученні силових факторів немає підстав не зважати на принцип суперпозиції або адитивності і не звертатись до закону Архімеда, проте його присутність і наслідки такої присутності будуть різними стосовно середовищ опари, масивів тіста та тістових заготовок. Очевидно, що стосовно опари сполучення закону Генрі, який визначає перехід до стану насичення

середовища діоксидом вуглецю і закону Архімеда, має безвідмовний результат по втраті CO₂. Або ж на підставі феноменологічних міркувань можемо хоча б стверджувати про переважну інтенсивність втрат CO₂ саме в опарі завдяки її фізичним властивостям.

У зв'язку з цими особливостями бажаним має бути збільшення тиску в системі для збільшення розчинності діоксиду вуглецю і обмеження втрат останнього. У зв'язку з цим перехід до фази одержання тіста на основі опари у своєму виконанні має бути якомога більш швидкоплинним з активним утворенням диспергованої газової фази.

Процеси зброджування хлібопекарських середовищ в мікробіологічних постановках мають відмінність від технологій зброджування цукровмістких середовищ для одержання етанолу, виноградного суслу, вторинного бродіння у виробництві шампанського, зброджування пивного сула тощо. Ця відмінність полягає у тому, що у всіх названих випадках для інтенсифікації життєдіяльності дріжджів здійснюють короткочасну аерацію середовищ та обмежують осмотичні та температурні шоки. Переведення дріжджів до короткочасного режиму зброджування в аеробних умовах інтенсифікує їх життєві процеси, в тому числі за анаеробних умов.

Очевидно, що такі різні підходи потребують додаткових пояснень. За потреби виконується активація пресованих дріжджів для виведення їх із стану анабіозу. Для цього готують живильне середовище з борошна або з борошняної заварки з додаванням сировини, збагаченої на ферменти, цукри, водорозчинні білки тощо і вносять в них дріжджі. Відбувається така активація протягом 30...90 хв. за температури 30...32°C.

Мікробіологічне забезпечення хлібопекарських виробництв здійснюється за використання дріжджів пресованих, які надходять охолодженими до температур 0...4°C, сушених дріжджів або дріжджового молока. В останньому випадку воно доставляється в автоцистернах, охолодженими до 3...10°C, а збереження на підприємствах здійснюється при температурі 2...15°C в чанах з охолодженням і перемішуванням.

Вирощування хлібопекарських дріжджів здійснюється на спеціалізованих підприємствах з використанням сукупності різних складних технологій. Очевидно, що у зв'язку з цим вони не поєднуються з хлібопекарськими виробництвами.

Вирощування дріжджів є кількастадійним і завершується передтоварною і товарною стадіями. Живильне середовище складається з цукрів меляси, азото- і фосфоромістких речовин, солей калію та інших мінеральних та

органічних речовин з присутністю біостимуляторів росту. Спрямованість процесів на синтез біомаси дріжджів досягається присутністю в рідинній фазі розчиненого кисню. Останнє досягається активною аерацією середовищ з використанням різних засобів інтенсифікації масообміну в газорідинному середовищі на межі поділу фаз [78–83].

Принциповою відмінністю аеробних і анаеробних умов синтезу біомаси мікроорганізмів і зброджування цукровмістких середовищ є утворення диспергованої газової фази. За аеробних умов її створення досягається введенням в середовище стиснутого повітря, тоді як за анаеробних умов газова фаза CO_2 формується у повному об'ємі середовища. Очевидно, що саме це визначає принципову різницю по газоутворювальній здатності, енергетичному потенціалу і гідродинамічним умовам масообміну.

Висновки до третього розділу

1. Газорідинні середовища, такі як зброжене тісто, є характерними для значної кількості бродильних технологій, хімічної, мікробіологічної і фармацевтичної промисловостей. З точки зору інтересів можливостей аналітичної оцінки прогнозованих впливів по інтенсифікації масо- і енергообмінних процесів запропоновано віднести їх до квазіпружних систем.

2. Ознакою бродильних систем є самогенерування газової фази за рахунок хімічної енергії цукрів, яка трансформується в енергію створення міжфазної поверхні, потенціальну енергію набухлого шару середовища, кінетичну енергію циркуляційних контурів, потенціальну енергію розчиненого діоксиду вуглецю і теплову енергію.

3. Віднесення газорідинних середовищ до квазіпружних систем дозволяє оцінити їх енергетичні потенціали і використати теорію коливань при визначенні шляхів інтенсифікації масообмінних процесів за рахунок накладання зовнішніх пульсаційних впливів – дії робочих органів машини.

4. Гідростатичні тиски середовищ, які відображують впливи робочих органів та гравітаційного поля, приводять до утворення концентраційних градієнтів по розчиненій газовій фазі.

5. Запропоновано математичну формалізацію оцінки динамічних параметрів квазіпружних середовищ і методики визначення їх кінематичних характеристик.

6. За допомогою математичної моделі зовнішніх впливів тисків на газорідинні середовища визначено частоту їх власних коливань і розроблено перспективи реалізації резонансних режимів.

7. Синтез аеробних мікроорганізмів у своїй ефективності в значній мірі залежить від рівнів концентрації розчиненого кисню в культуральних середовищах. Технологічні режими при цьому будуються на основі балансів вхідного потоку живлення, доставки в середовища кисню і динаміки приросту біомаси. Забезпечення розрахункового вхідного потоку живлення не викликає складностей, як і підтримання номінальної температури середовища. Бажання мати високий рівень приросту біомаси приводить до протиріччя з можливостями аераційних систем. Саме останнє приводить до зниження виходу цільової продукції. Наприклад, у виробництві хлібопекарських дріжджів виходи по малясі знаходяться у діапазоні від 65 до 90%. Практично перевірено і теоретично узгоджено положення про те, що координата у вказаному діапазоні 65...90 в значній мірі залежить від концентрації розчиненого кисню. Саме це визначає необхідність подальшого пошуку в напрямку удосконалення обладнання для вирощування мікроорганізмів, аераційних систем та інтенсифікації процесів масообміну в газорідних системах.

8. Подальший розвиток теоретичного підґрунтя стосується співвідношень геометричних параметрів апаратів, особливостей енерговведення з вхідним газовим потоком та формування міжфазної поверхні. Існує необхідність в оцінці впливів співвідношень геометричних параметрів апаратів на рушійний фактор масообміну та гідродинаміку газорідних середовищ.

9. Сучасний рівень теорії, що стосується дискретно-імпульсних теплотехнологій і кавітаційних явищ дозволяє розповсюдити її на газорідні системи і застосувати такі методи для інтенсифікації масообміну в них.

10. З урахуванням особливостей перебігу масообмінних процесів в газорідних середовищах значної висоти тепло- масообмінні процеси, що в них відбуваються, слід віднести до нестационарних нелінійних процесів. У зв'язку з цим застосування лінійних кінетичних рівнянь стосовно них можливе лише за певних застережень.

11. В основу нових поглиблених досліджень масообмінних процесів доцільно покласти енергетичні співвідношення. У зв'язку з цим заслуговує на увагу вивчення і одержання теоретичного підґрунтя трансформації енергетичних і матеріальних вхідних і вихідних потоків та їх впливів на процеси масообміну і біосинтезу.

Список використаної літератури

1. Стадник І. Я., Піддубний А. В. Удосконалення технологічного процесу та обладнання для формування виробів: монографія. К.: 2019, 290 с.
2. Дробот В. І. Технологія хлібопекарського виробництва. К.: ЛО-ГОС, 2002. 365 с.
3. Sokolenko A., Shevchenko O., Piddubnyy V. Intensification of mass-exchange processes in food technologies. К.: Luxar, 2008. 443 p.
4. URL: <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/21076/1/10.pdf>.
5. Пащенко Л. П. Биотехнологические основы производства хлебобулочных изделий. М.: Колос, 2002. 368 с.
6. Stadnyk I., 2013. *Scientific and technological bases of processes and development of equipment for loosely mixing of dough: dissertation theses*. Kyiv, Ukraine: National University of Food Technologies, 40 p. URL: www.elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/20799/1/Monohrafiya_Stadnyk.pdf.
7. Crawford R. J., Webb H. K., Truong V. K., Hasan J., Ivanova E. P. Advances in Colloid and Interface Science. 2012. Vol. 179. P. 142–149.
8. Stadnyk V. Piddubnyy O. Eremeeva G. Karpyk Features of heat transfer in the environment when it is sprayed with rotary rollers. *Potravinarstvo Slovak Journal for Food Sciences*, vol. 12, 2018, no. 1, p. 824–835. DOI: <https://doi.org/10.5219/977>.

РОЗДІЛ 4

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ, ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ДЕФОРМАЦІЮ ТІСТА ПРИ НАГНІТАННІ

4.1. Обґрунтування валкового нагнітання у формувальних машинах – основа для синтезу їх ефективності

Технічний прогрес є складовою частиною об'єктивного процесу розвитку суспільства і його виробничих структур. У харчовій промисловості технічний прогрес направлено на вирішення актуальних завдань покращення якості конкурентоспроможності, розширення номенклатури продукції, освоєння нових видів, економії сировини, палива, води, теплової електричної енергії, зменшення відходів виробництва. Кожна із цих задач являє собою комплекс складних проблем і невирішених питань. З метою їх вирішення постійно виконуються фундаментальні прикладні дослідження, що представляють реальні рекомендації у вигляді технічних і технологічних рішень. Коректне їх використання забезпечить додаткові відчутні переваги і усунення негативних ефектів.

Для багатьох харчових, мікробіологічних, фармацевтичних процесів, особливо для технологічних, виникає все більша потреба в точних визначеннях характеристик для пошуку оптимальних конструктивних і технологічних рішень, направлених на збільшення надійості, покращення експлуатаційних характеристик машин і зниження енергоємності, покращення екологічної безпеки.

Нагнітання тіста валками – це спосіб обробки тіста пластичною деформацією, що є найбільш поширеним методом в хлібопекарській та кондитерській промисловості при формуванні виробів. Даний метод зародився в XVIII столітті і з часом досяг високого удосконалення. Суть процесу: маса тіста в робочій камері машини обжимається (стискується) проходячи в зазорі між обертовими валками, при цьому, воно зменшується в поперечному сеченні і збільшується по довжині. Форма поперечного сечення називається профілем.

Процес проходження тіста між валками забезпечується силами тертя обертових поверхонь валів та тіста. Завдяки рихлевій поверхні валків тісто переміщається в зазорі між ними, одночасно деформується. В момент затягування тіста кожним валком, відбувається вплив двох сил: нормальної сили і дотичної сили тертя.

Створення ефективної технології – це завжди наукові дослідження, які спрямовані на одержання нових результатів. Тут присутні: постановка завдання, аналіз вихідної інформації, формування робочих гіпотез, їх теоретичне дослідження, організація, планування, виконання експериментів, аналіз і узагальнення результатів, перевірка коректності прийнятих гіпотезів на основі отриманих даних, обґрунтування висновків, виявлених закономірностей і прогнозів [1].

Створення нових і удосконалення діючих технологій у теперішній час не може обмежуватися різними напівемпіричними підходами, побудованими на основі тільки виробничого досвіду. Вони повинні спиратися на надійних фундаментальних теоретичних висновках. Тому розвиток теорії розкачування йде шляхом розробки методів достатньо точного кількісного опису процесів, що проходять в тісті при його формозміні в міжвалковій зазорі після деформації. Всебічне дослідження поведінки тіста в зоні деформування при розкачуванні і нагнітанні та встановленні закономірностей, що звязують параметри якості з режимами їх деформації, можливі лише при використанні методів механіки суцільного середовища. Вони дозволяють проводити кількісні оцінки проходять в тісті перетворень. Для аналізу цих процесів необхідно врахувати основні реологічні властивості, умови на поверхнійого контакту з валками і інші фактори.

В той же час значна частина досягнень фундаментальних наук не знаходить відповідного застосування при рішенні нових теоретичних і прикладних задач валків на тісто. До їх чисел необхідно віднести прогнозування структури і властивостей середовища, дефектів, напружень, деформації навантаження в обробленому середовищі.

Можливості використання цих даних для формування тістової заготовки із необхідними, в умовах практики, формою і розмірами вивчено недостатньо. При цьому встановлено, що формування тістового пласта з мінімальним ущільненням і збереженням формоудержуючих властивостей забезпечується тільки при використанні поетапної розкати валками циліндричної форми. Всі ці дані на сьогоднішній час вимагають нових результатів, так як відбулися зміни в замішуванні тіста, властивостях компонентів та рецептурі.

Поставлена проблема визначила сучасні тенденції конструювання валкових робочих органів у машин різного класу, де вони виконують робочі процеси: розкачування, нагнітання, замішування, транспортування. Винахідники постійно спрямовують свої розрахунки, конструкції на оптимізацію

профілю і конструктивних елементів, застосування збірних конструкцій, використання матеріалів і покриттів.

Таким чином, внаслідок багатofакторності, складної взаємозалежності, багатостадійності виробничих процесів не можливо без достатньо суворого обґрунтування вивчити процес. Коректність врахування максимальної кількості впливових факторів повинно базуватися на результатах нових досліджень, які представляють собою признані досягнення науково-технічного прогресу.

Надійність технологічного процесу розкачування і нагнітання у виробництві бубликів, сушки, пряників та іншої продукції, повинна забезпечити мінімальну дисперсію кількісних характеристик показників їх якості. Відповідно створюються нові можливості для визначення впливу нестабільності вихідних параметрів, які виникають в ході технологічного перепаду на показники якості готової продукції.

Названі аспекти аналізу технологічного процесу впливу валкових робочих органів на тісто слабо висвітлені в технічній літературі. Встановлені результати вимагають подальшої систематизації доведення до практичного використання. Очевидно, що такі перспективні методи дослідження конструктивних і технологічних параметрів як статистичне імітаційне моделювання, дозволяє найбільш об'єктивно аналізувати виявляти закономірності, взаємозв'язки технологічної якості продукції на всіх етапах його виробництва. Тому необхідно детально розкрити дію валків на середовище.

4.1.2. Методологія прогнозування процесів нагнітання і розкачування

Під час проходження процесу нагнітання тіста завжди можна запропонувати кілька конкуруючих варіантів. Вибір оптимального варіанта процесу має забезпечувати максимальне або мінімальне значення параметра (критерію). Критерієм оптимізації при дії валків вибирається мінімальна вартість продукції, максимальна продуктивність, висока якість готового продукту й мінімальні витрати сировини або енергії на одиницю продукції. Саме виконання цих вимог з погляду оптимізації слід розглядати окремо, але існують деякі загальні рекомендації, які треба враховувати, вибираючи оптимальну конструкцію валків та їх параметри процесу [2]. Тому дискретність дії валків дає можливість зменшувати витрати енергії на процес, підтримувати постійну якість продукту, спрощує контроль, механізацію та

автоматизацію процесу. Додержання протитечії потоків та оновлення поверхні контакту фаз між якими здійснюється обмін теплотою або масою, сприяє максимальному використанню енергії теплоносія під час теплообміну або максимальному вилученню маси під час масообміну. Під час такого оновлення безпосередній контакт вступають свіжі елементи середовища. При цьому рушійна сила процесу збільшується, процес прискорюється.

Ряд винахідників відзначають значний вплив частоти обертання валків на інтенсивність течії середовища і якість готової продукції. Стверджується [4, 5, 7], що при дії валків існує критичне значення швидкості і витраченої енергії. Критичним рівнем витраченої енергії вважається таке значення, при якому тісто при обробці отримує максимальні деформації. Однак найчастіше приймаються і помилкові технічні рішення. Справа в тому, що при інтенсивному деформівному впливі на тісто валкових робочих органів затрачувана енергія розподіляється за двома напрямками. Енергія, що витрачається на зміщення макромолекулярної структури дозрілого тіста, дає позитивний технологічний ефект, а її витрати, пов'язані із внутрішнім тертям, варто вважати корисними. Витрати на зовнішнє тертя валкових робочих органів і стінки робочої камери, що супроводжуються виділенням тепла, роблять негативний вплив на технологічний процес формування. Вони знижують якість тіста, що супроводжує додаткові витрати як сировини так і енерговитрат. Співвідношення корисних і шкідливих витрат визначається здебільшого конструкцією валкових робочих органів машини, робочою камерою та їх взаємодією при нагнітанні та розкачуванні. Тому при створенні конструкції машини для обробки тіста валками необхідно враховувати енергетичні аспекти процесу, конструктивні параметри, при цьому забезпечувати зниження його енергомісткості.

Складність процесів формування борошняного тіста зумовлена його специфічними властивостями: липкістю, пружністю, еластичністю та пластичністю. При формуванні вибродженого (хлібного) та прісного (макаронного) тіста відбуваються різні процеси. Основна відмінність зумовлена специфічністю властивостей зброженого тіста, що має капілярно-пористу структуру, в порах якої утримується достатня кількість газоподібних продуктів бродіння [6]. При формуванні валками таке тісто втрачає значну частину газів, зменшується в об'ємі, ущільнюється.

Процеси, що відбуваються у вузлах нагнітання формувальних машин, мають специфіку: вони здійснюються циклічно за порівняно короткий час, що обчислюється секундами або їх частками. Тому при їх аналізі треба

враховувати лише ті процеси, які за час робочого циклу валка істотно впливають на властивості тіста або сам процес. Бродіння тіста проходить дуже повільно і тому на цій стадії не враховується. Короткочасний вплив тиску та механічного перемішування, які мають місце в робочій камері, істотно впливають на структуру, фізико-механічні властивості тіста та характер наступного його формування. Вони є визначальними факторами при виборі параметрів формувальної машини з валками.

До останнього часу при розгляді робочого процесу машини звертали увагу здебільшого на один бік процесу: вплив тиску між валками на точність тістових заготовок. Слід звернути увагу на істотний вплив процесів, що відбуваються в робочій камері, на зміну властивостей тіста на наступних етапах технологічного процесу: формуванні та випіканні [5, 6].

При дії тиску на зброжене тісто в ньому зменшується об'єм газової фази та проходить поглинання частини газу тістом, а при одночасному інтенсивному механічному перемішуванні газові бульбашки поділяються на менші, що сприяє утворенню рівномірної мікропористої структури та видаленню великих бульбашок [6, 7]. Така структура спроможна краще утримувати газове середовище на наступних етапах технологічного процесу.

Зброжене тісто після будь-якої механічної обробки (розкачування, обкатування) має приблизно постійну об'ємну масу, яка значно нижча, ніж для свіжезамішаного тіста. Розпушування тіста до нагнітання потрібне не тільки для збільшення його об'єму, а й для нагромадження смакових та ароматичних речовин. На отримання добре розпушеного кінцевого продукту – бубликів, сушки в основному впливає накопичення газового середовища після закінчення механічного впливу валків. Розпушене тісто після будь-якої механічної обробки легко втрачає деяку частину газового середовища та достатньо міцно утримує іншу її частину [8, 9].

4.2. Динаміки міжфазової взаємодії в тісті при деформації

Одним із шляхів зменшення собівартості продукції є оптимізація апаратурної реалізації виробництв з енергетичної точки зору, тобто зменшення споживання теплової та (або) електричної енергії на одиницю кінцевого продукту. Для досягнення такого ефекту необхідно на кожному етапі технологічного процесу виробництва визначати енергетичний потенціал матеріальних потоків, потребу в енергії для реалізації заданих перетворень матеріального потоку та можливі шляхи мінімізації втрат теплової енергії та

енергії хімічних зв'язків. Це спонукає до необхідності забезпечення повної відповідності режимів обробки структурно-механічних властивостей в'язкого середовища конструктивними формами і параметрами валкових робочих органів.

У більшості випадків в дослідженнях не враховувались втрати енергії фізико-хімічних зв'язків при визначенні оптимальних методів виробництва. Доцільність вибору певних технологічних параметрів оцінювали з точки зору збільшення виходу кінцевого продукту. Комплексне порівняння різних технологічних схем з енергетичної точки зору проведено не було. Це зумовило напрямки наших досліджень.

У зв'язку з викладеним, до числа завдань віднесено наступне:

- поглиблений аналіз теплофізичних процесів при нагнітанні;
- оцінка енергетичних ресурсів і розробка пропозицій щодо їх зменшення;
- удосконалення апаратного виконання технологій пов'язаних з суміщенням в часі процесу затягування, розкачування, стискання та нагнітання;
- визначення факторів, які впливають на температурні потоки на основі термодинамічної моделі робочого процесу формувальної машини;
- теоретичне дослідження температурних потоків;
- експериментальні дослідження температурних потоків.

Одним з факторів, який характеризує процес часткового перетворення вхідного напівфабрикату при дії валків, є зміна загальної внутрішньої енергії хімічних зв'язків матеріального потоку. Ця енергія може бути виділена при руйнуванні хімічних зв'язків сполук під час механічних впливів на оброблюване тісто. До таких механічних впливів належить цілий комплекс деформацій, що викладені раніше. При цих процесах енергія частково витрачається на утворення нових хімічних зв'язків, а частково втрачається в навколишньому середовищі.

Аналіз існуючих методів [10, 11] розрахунку машин з валковими робочими органами дозволив провести визначення коефіцієнта подачі, встановити вплив конструктивних параметрів, споживаної потужності тарелогії на течію маси тіста між валками. Дані свідчать про розрізненість їх підходів. Вони пов'язані з введенням великої кількості експериментальних коефіцієнтів для співвідношення робочих середовищ. Спостерігається практична відсутність у визначенні режимів роботи валкового вузла

формувальної машини. Вплив тепломасообмінних процесів на роботу валків враховувався не всіма дослідниками та різною мірою.

Проведені теоретичні дослідження (розділ 1, 2) показали, що далеко не завжди доцільно використовувати реологічні залежності при робочих процесах нагнітання тіста валками. З іншого боку всі літературні джерела свідчать про відсутність альтернативних досліджень, навіть теоретичних про деформаційні процеси, що пов'язані із зміною температури оброблюваного тіста. Це пояснюється складністю процесів, що відбуваються у вузлі подачі тіста робочими валками машини.

Саме тому дана робота спрямована на розроблення узагальненої моделі робочого процесу дії валків на тісто. Вона спрямована на отримання конструктивних, витратних та енергетичних характеристик та визначення шляхів підвищення ефективності роботи такого класу машин у деформаційних режимах.

Удосконалення конструкцій машин з валковими робочими органами базується на розумінні нюансів процесів, що відбуваються при забезпеченні раціональних параметрів текучості тіста. Тому оптимізація конструктивного виконання основних вузлів машини відіграє важливу функціональну залежність якості, енергозбереження. Детальне вивчення й аналіз суті процесу на базі теоретичних поглядів і досліджень, що описують зміни, виробляють доцільність підтвердити можливі шляхи удосконалення валкового вузла.

Завантаження тіста на валки дискретної дії після змішувача періодичної дії здійснюється у вигляді шматків. При цьому завантаження зазвичай здійснюють з одного торця валків, а відбір – з іншого, що подається на формувальний пристрій. Таким чином, при безперервному нагнітанні, вальцюванні та перемішуванні, тісто послідовно проходить ділянки міжвалкового проміжку. Ділянки чергуються із зонами контакту тіста з нагрітим до певної температури. Ефективність нагнітально-змішувальних процесів з одного боку, і навколишнім повітрям, з другого, впливає на температуру тіста і валка. При цьому температура тіста поступово зростає. З метою інтенсифікації процесу, винахідники прагнуть до зменшення кількості проходів тіста крізь валковий проміжок (однак при цьому знижується продуктивність валків і зростає небезпека термодеструкції компонентів матеріалу).

Основи теорії подачі тіста валками розглядаються виходячи із того, що цей процес є багатофакторною технологічною ланкою у формувальних машинах. Ця багатофакторна технологічна ланка не піддається зведенню її до

примітивного процесу. Процеси супроводжуються масообміном (перерозподілом) складових фаз, зміною об'єму дисперсної системи та її деформацією, тобто одночасним протіканням деформаційних, хімічних, температурних та масообмінних процесів. Отже, валки трансформують свою енергію на зміну внутрішньої енергії системи при переході її з одного стану в інший, що дорівнює сумі роботи зовнішніх сил і кількості переданого тепла.

За фізичним механізмом процес можна поділити на три основні групи:

- перша складає перенесення розчинених речовин в тісті, зважених частинок і теплоти на малі відстані у порівнянні з розмірами камери. Їх результат визначається макромасштабними характеристиками течії тіста в нагнітальній камері машини;

- друга утворює дроблення бульбашок на поверхнях валка і камери. Розміри бульбашок визначаються головним чином течією і величиною здвигових деформацій в малих елементах об'єму тіста. Швидкість перенесення в елементах об'єму таких малих масштабів (явищ мікросміщення) визначається в першу чергу фізико-хімічними властивостями компонентів, а також впливом макромасштабної структури потоку.

- третя утворює явища тепло- і масообміну на межах розділу рідина-поверхня валків і корпус камери, внутрішнє в'язке тертя (зважені частинки, краплі, бульбашки). Основний вплив на швидкість перенесення теплоти здійснюють характеристики прикордонного шару, що залежать від умов перебігу течії тіста в безпосередній близькості до міжфазової поверхні.

При дії обертових валків тістова маса постійно змінює затрачену енергію, яка розподіляється на корисну і шкідливу. Енергія витрачається на зміну макромолекулярної структури тіста і дає позитивний технологічний ефект, оскільки при його проходженні між валками відбувається значне нагрівання тіста. За рахунок збільшення вільної поверхневої енергії і будови поверхневого шару, структури і складу – відбувається прискорення фізичних і хімічних перетворень в цих шарах. Це визначає характер і швидкість гетерогенного процесу. Таким чином, поверхневий розвиток – це збільшення взаємозв'язаних фаз компонентів на кордоні зіткнення, що проходить на стадії нагнітання тіста в робочій камері формувальної машини.

На сучасному етапі є необхідним впровадження якісно нових способів дії валків на середовище. Задача ускладнюється тим, що єдиної теорії яка б пояснювала принципи валкового якісного нагнітання не існує. Тому встановлення взаємозв'язку між конструктивними особливостями вузла нагнітання та технологічними параметрами процесів формування є

інформаційною базою для створення нових та удосконалення існуючих технологій виробництва бубликових виробів.

Прогнозування якості нагнітання ґрунтується на виборі енергетичної дії валків в ході процесу. При цьому даний науковий підхід розглядаємо у взаємозв'язку конструктивних та технологічних показників і теоретичних передумов. Характер взаємодії енергетичних перетворень, структурно-механічних і фізичних властивостей тіста реально впливає на весь процес формування. Зміни в тісті базуються на зміні кислотності, об'єму, пружних властивостей, об'єму виділеного газу при додержанні температурних режимів.

4.2.1. Особливості зброджування цукровмісткого тіста в технології виробництва бубликів

Зупинимося на більш ґрунтовному аналізі явищ енерго- і масообміну, який має місце в міжвалковому зазорі. Початок процесу нагнітання відповідає при заповненні камери тістом. Розчин сухих речовин в рідинному середовищі після доволі енергонасичених етапів попередньої обробки є структурою з високим рівнем гомогенізації, однак дріжджові клітини здатні до процесів седиментації [8, 12]. Саме це визначає створення гідродинамічних режимів з підвищеними рівнями енергетичних потенціалів.

Об'єм середовища $V_{\text{сер}}$ разом з концентрацією дріжджів і коефіцієнтом приросту біомаси μ визначають величину $dM_{\text{ц}}/dt$.

На етапі міжвалкового нагнітання виникає примусовий циркуляційний контур тіста за рахунок обертових валків і їх поверхневої конструкції (рис. 4.1). Оскільки тісто має найбільш нагріту поверхню в нижній частині об'єму, що контактує з валками, то висхідна його часткова в'язка циркуляція має розпочинатися від зони затягування, стискання до зони нагнітання. Цьому сприяють конструкція камери, валка і об'єм тіста. За висоти шару газорідинної фази від 0.2 до 0.4 м над обертовими валками здійснюється циркуляційний контур. За рахунок цього постійно відбувається зворотня течія стиснутої газорідинної фази у верхню частину. Присутність циркуляції з частковим перемішуванням дозволяє помітно знизити тиск газової фази, температуру.

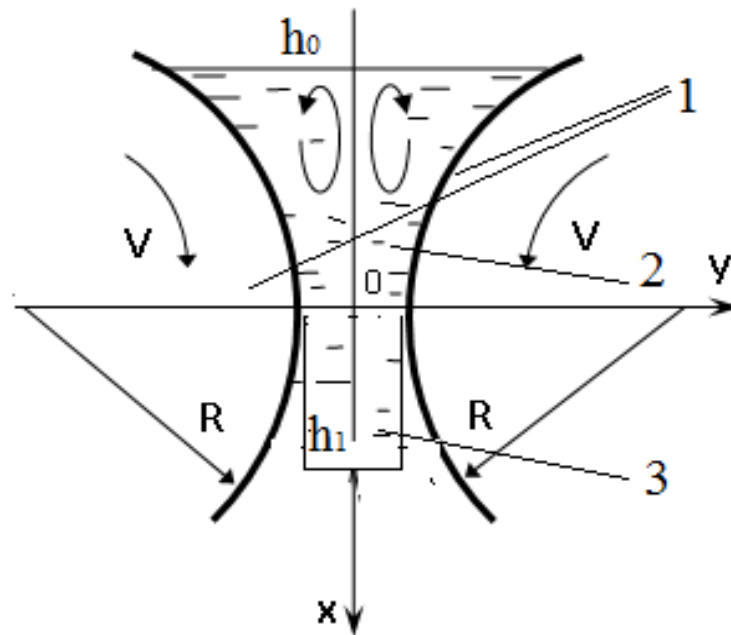


Рис. 4.1. Циркуляційні потоки тіста на стадії зтягування: 1 – валки; 2 – тісто до нагнітання; 3 – тісто після нагнітання

Відомо [8, 9], що величина утримувальної здатності пов'язана з синтезом CO_2 . Разом з тим присутність гідростатичного тиску на етапі зтягування тіста і у зв'язку з законом Генрі, приносить свій вплив на динаміку газоутворення. Утворена диспергована газова фаза перебуває відповідно у верхніх шарах з найменшим гідростатичним тиском. Повномасштабна циркуляція відсутня, оскільки течія відповідає тільки температурний потік, що зароджується при дії валків. Утворення та відновлення газової фази на всій висоті тіста в камері машини означає важливий наслідок щодо умови, яка відбувається у формі $u = u(h) \neq \text{const}$.

Спливання бульбашок з нижньої частини об'єму тіста доповнює вище розташовані частини. Виходячи з аналізу фізичних явищ, які відбуваються в системі з дисперговою фазою, підтверджує раніше сформульовану оцінку про важливість впливів геометричних параметрів валків [8].

В об'ємі тіста навіть на обмеженій висоті h_0 призводить до підвищеного вмісту в ньому диспергової газової фази. Важливим фактором, який впливає на зростання елементів диспергової газової фази є відстань між точками їх утворення, тобто взаємодія шарів тіста. При не значній відстані, що відбувається в зворотному потоці, збільшується кількість зародків бульбашок. Це у свою чергу веде до еквівалентного збільшення кількості CO_2 , що виділяється із диспергової газової фази, а не на створення нової.

За таких умов в тісті виникає активний висхідний газорідинний потік, який підсилюється потенціалом подрібленого і розчиненого газу. Це дозволяє призупиняти нагрівання по завершенні дії валків. Енергетичне джерело у такому випадку обумовлюється градієнтом розчиненого CO₂ по висоті тіста в камері нагнітання.

Спливання бульбашок супроводжується їх деформацією з переходом до форми еліпсоїдів під дією деформації тіста. Особливістю бульбашок газу різного радіусу є властивість дифузії CO₂ через стінки в напрямку від більшого до меншого тиску з вирівнюванням його. При наявності тиску і середнього розміру газових бульбашок, знаючи в'язкість тіста, швидкість піднімання можна визначити по закону Стокса [1].

Отже, зміна тиску в бульбашках, що генеровані на різній висоті, будуть суттєво різними. Очевидно, що від моменту їх взаємодії продовжується масообмін. За умов такої взаємодії, зниження гідростатичного тиску в бульбашках під час їх спливання, покращуються процеси нагнітання та зменшується вплив на зношування рихлів валка.

Водночас слід врахувати, що швидкість спливання елемента диспергованої газової фази не буде зростати безкінечно, а тільки до певної межі – максимальної швидкості спливання окремого елемента диспергованої газової фази v_{∞} . З літературних джерел відомо [8], що досягнення цієї швидкості буде відбуватися миттєво, тому можна вважати, що швидкість спливання v_{∞} не залежить від часу, а тільки від геометричних параметрів валків та фізико-хімічних параметрів тіста. Кількість і розміри бульбашок газу визначають енергією, структурно-механічні властивості тіста, та його газопроникливість.

Залежність v_{∞} від фізико-механічних властивостей рідини була експериментально підтверджена ще американським фізиком Піблсом та німецьким хіміком Габером. При цьому достатньо точно її можна описати за допомогою рівняння, отриманого Новье Стоксом [1]. Дане рівняння можна записати в наступному вигляді:

$$v_{\infty} = \frac{1}{18} \frac{D_{\text{дзф}}^2 g (\rho_p - \rho_2)}{\mu_p}, \quad (4.1)$$

де $D_{\text{дзф}}$ – діаметр елемента диспергованої газової фази на момент відриву від поверхні на якій він виник;

μ_p – коефіцієнт в'язкості тіста.

Дане рівняння має практичне значення, що дозволяє встановити залежність швидкості збільшення площі середовища від густини і в'язкості, розмірів окремих бульбашок. Це також визначає енергію зміни середовища.

При визначенні відносної швидкості видалення диспергованої газової фази було використане припущення, що весь вуглекислий газ, який виділяється при нагнітанні тіста, виділяється з нього. Це твердження справедливе для всього процесу, окрім початкового періоду, коли відбувається завантаження нового шару тіста та періоду створення умов стискання над межею поділу фаз.

На початку процесу вуглекислий газ з тіста не виділяється, тому для цього проміжку часу $v_{p-z} = 0$. За період створення дискретного додатково нагнітання виділиться об'єм вуглекислого газу еквівалентний зміні вуглекислого газу в тісті, який відповідає зміні тиску над межею поділу фаз.

Додатковим впливом на систему щодо її нелінійності є зміна гідродинамічних режимів. З несталою динамікою утворення диспергованої газової фази коефіцієнт тепловіддачі α_1 від тіста до поверхні теплообміну валка визначається через сукупність його фізико-хімічних властивостей і швидкості обтікання поверхні теплопередачі потоком тіста (газорідинним).

З робіт російського вченого Я. Б. Зельдовіча [8], які присвячені гідродинамічним розрахункам видно, що ймовірність виникнення бульбашок диспергованої газової фази X повторно не розчиниться в розчині через наявний в ній тиск і характеризується рівнянням:

$$X = k_1 \exp\left(\frac{-4\pi R_{\min}^2 \sigma_{p-z}}{3RT}\right), \quad (4.2)$$

де R_{\min} – мінімальний радіус елементу диспергованої газової фази, який може утворитися;

σ_{p-g} – поверхневий натяг на межі поділу рідина-газова фаза;

R – газова стала;

T – температура середовища;

k_1 – коефіцієнт пропорційності.

Розмір критичного радіусу елементу диспергованої газової фази R_{\min} можна визначити за рівнянням виведеним російськими вченими Я. І. Френкелем та В. І. Классеном [3]:

$$R_{\min} = \frac{2\sigma_{p-z}}{k\Delta C} = \frac{2\sigma_{p-z}}{\Delta p}, \quad (4.3)$$

де σ_{p-g} – поверхневий натяг на межі поділу фаз рідина-газ;

k – константа Генрі;

ΔC – пересичення розчину газом, Δp – різниця між тиском в системі підведення газу та гідростатичним тиском.

Аналізуючи формулу (4.2) напрашується висновок, що зниження тиску в надрідинному просторі призведе до зменшення кількості елементів диспергованої газової фази, які утворюються в одиниці об'єму матеріального потоку.

Зміна радіуса елементу диспергованої газової фази відбувається за рахунок насичення його внутрішнього простору вуглекислим газом, парами води та спирту. Відповідно час його існування на поверхні, де він утворився, буде залежати від інтенсивності процесу течії тіста та його густини. Після досягнення критичного діаметру відбувається відрив елементу від поверхні та спливання.

Діаметр елементу диспергованої газової фази на момент відриву від поверхні, можна визначити за наступною залежністю [8]:

$$D_{\partial z\phi} = 0,018\theta \left(\frac{\sigma_{p-g}}{\rho_p - \rho_g} \right)^{1/2}, \quad (4.4)$$

де θ – краєвий кут між елементом та поверхнею нагрівання. Для сталюї робочої камери, валків та густого середовища даний параметр буде знаходитися в межах 35–40° (0,611–0,698 рад) [4];

ρ_p – густина рідини (тіста);

ρ_g – густина газової фази.

Аналізуючи наші дослідження, ми прийшли до висновку, що основне значення мають відносний рух рідинної і газової фаз тіста, що є необхідною передумовою швидкого процесу переміщення. Отже, однією з важливих завдань є розхід тіста, що залежить від ряду факторів: величини стискання тіста, в'язкості, частоти обертання валка і формівного каналу.

Крім гідродинамічної ділянки існують теплова та дифузійна ділянки, що суттєво змінюють в'язкість та швидкість зсуву. В свою чергу це визначає і впливає на гідродинамічні параметри потоку, причому довжини цих ділянок можуть бути різними. Така течія із змінною формою і площею поперечного

перерізу має надзвичайно складний характер і є ефективною оцінкою профілю поверхні теплообміну.

4.2.2. Визначення геометричних параметрів вузла нагнітання тіста

Одночасно до числа головних вимог формувальних машин з валковими робочими органами відноситься відповідність продуктивності, надійність підтримання номінальних температурних параметрів, швидкості течії тіста, обмеженому піноутворенню тощо. Тому вибір геометрії валка орієнтується на деякі особливості та додаткові запити. Так до числа важливих може відноситися вимога мінімізації витрат енергоресурсів, матеріалу на виготовлення валків, надійність усього процесу. Отже, цим факторам відповідає рівність діаметра і довжини з пазами циліндричного валка. При цьому очевидно, що мінімальним витратам матеріалу має відповідати мінімальна площа поверхні за інших рівних умов і при дотриманні заданої умови якісного нагнітання. Математичне співвідношення між поверхнею валка S і його об'ємом V , для циліндричного:

$$S_B = \pi d l + \frac{\pi d^2}{4};$$

$$V_B = \frac{\pi d^2}{4} l,$$

де d і l – відповідно діаметр і довжина валка.

Якщо прийняти умову мінімізації його поверхні $l = d$, то ввівши цю умову у рівняння та врахувавши корисну робочу площу валка, запишемо:

$$S_B = \pi d^2 + \frac{\pi d^2}{2} = 1.5 \pi d^2;$$

$$V_B = \pi d^3,$$

Звідси випливає очікуваний висновок про те, що поверхня валка пропорційна квадрату його розміру, а об'єм – кубу цього ж розміру. Визначимо їх співвідношення у формі:

$$S_b/V_b = 1.5/d.$$

Аналіз рівняння дає можливість встановити, що питома площа поверхні (площа поверхні віднесена до об'єму) різко зменшується за формулою гіперболи, що відображається нижче наведеним співвідношенням:

D	0,1	0,15	0,2	0,25
S_b/V_b	0.07	0.1	0.13	0.17

Отже, нарощування геометричного параметра d в решті-решт може привести до неможливості стабілізації нагнітання, а це і зміни структурно-механічних властивостей тіста. Наші дослідження підтверджують раніше встановлені геометричні параметри валків у формувальних машинах, що мають діаметри від 160...200 мм. В тістоподільних машинах їх діаметр може змінюватися в залежності від конструкції камери нагнітання, ділильної головки. Таким чином конструктивні параметри впливають на структурно-механічні властивості тіста, так як відбувається в'язке тертя і відповідно, зміна температури. Це дало змогу розробити нову конструкцію валків (див. розділ 6), які досліджувались при написанні монографії.

4.3. Взаємозв'язок чинників при дії валкових робочих органів

Одними із найважливіших питань у розробці методології прогнозування процесів нагнітання і розкачування є пошук критеріїв якості, умов затягування, стискання та нагнітання при відповідній продуктивності. Формально згадані процеси можна подати як засіб зміни властивостей оброблюваного середовища одним з відомих способів дії обертових валків з метою подачі на формувальний пристрій машини або подальший технологічний процес. Така схема відображає основне завдання реалізації процесу нагнітання і розкачування, що полягає у виборі або створенні валкових робочих органів для конкретного середовища з метою отримання необхідного результату.

Для аналізу процесу нагнітання і розкачування доцільно розглядати його у вигляді окремих стадій: завантаження маси середовища у зону нагнітання; збільшення зусиль навантаження (затягування, транспортування, перемішування) до початку нагнітання; стискання його в робочій зоні; сам процес багатократного оброблення і видалення середовища із зони дії валків.

Загальна деформація механічної моделі нагнітання тіста валками складається з нелінійно-пружної з модулем пружності $E_1(\sigma)$, що забезпечується

нелінійно пружними елементами, еластичної з модулем пружності E_1 , в'язкість η_1 , що забезпечує паралельно з'єднаними лінійно пружним і в'язким елементами. Одночасно пластичної з нелінійним модулем пружності $E_2(\sigma)$, в'язкістю η_2 і фіксатором Φ , що забезпечується послідовно з'єднаними нелінійно пружними і в'язким елементами з приєднаними до них елементом фіксатором.

Це дозволяє встановити їхні закономірності і обчислити раціональні параметри окремих операцій. Тобто ґрунтовно оцінити вплив конструктивних параметрів: робочої камери та поверхні валка при відповідному куті затягування маси; конструктивних елементів на точність проходження процесу та властивості тіста після витікання його із зазору; питоме споживання енергії, надійність і тривалість роботи валкової машини.

В процесі нагнітання тіста, коли тривалість взаємодії валкових органів з ним малий і воно не встигає проявити всі особливості високоеластичної деформації, тоді його модуль може бути поданий у вигляді пружних тіл, що мають деяку в'язкість. Крім того, деформація в зоні нагнітання не завжди пропорційна навантаженню, так як на цей процес впливають внутрішнє тертя і зовнішнє. Воно виникає внаслідок пластичної деформації структурно-механічних властивостей тіста та конструкції поверхні валків. Проте, сумарна деформація процесу залишається на досягнутому рівні. Величина загальної деформації моделі під дією валків (навантаження) буде мати вигляд:

$$\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_e \text{ або } \varepsilon = \sigma / E(\sigma) + \sigma t / \eta,$$

де ε_n – величина пружної і в'язкої деформацій;

σ – величина діючого навантаження (стискання), Н;

t – час дії валків на дільниці, с;

$E(\sigma)$ та η – комплексний модуль пружності і в'язкості тіста.

На основі розроблених підходів для опису процесу нагнітання тіста в зазорі між валками, було використано гідродинамічну теорію каландрування псевдопластичної рідини [14]. Це дозволяє встановити кількісні залежності між геометричними характеристиками робочого простору (зазора) та властивостями матеріалів і режимів обробки [5, 6]. При використанні даної теорії процесу одержано ряд формул, що дозволяють визначити тиск в зазорі між валками, виходячи із параметрів та в'язкості середовища. Аналогічні дані залежності можуть застосовуватись для процесу валкового нагнітання при наявності протитискув в камері нагнітання – тістоподільні машини.

Всі ці дані та їх методи дозволяють систематизувати матеріали досліджень, виявити та сформулювати задачі та ціль розрахунку. У всіх роботах підходи до розрахунку параметрів однакові. Спільним недоліком цих методик є неможливість визначення впливу геометричних розмірів робочих органів (валків), камери та показників реології на споживання енергоресурсів при встановленні процесу формування в машинах даного класу. Виходячи із цього, основною ціллю роботи є методика визначення корисної питомої потужності на основі крутного моменту та тиску в зазорі між валками при врахуванні реологічних параметрів.

Закономірність зміни товщини пласту тіста по ходу розкатки між валками приведено на рис. 4.2. При розкачуванні валками циліндричної форми товщина тіста постійно змінюється в середній частині пласта, тобто в зоні захватування. На виході із валків – товщина однакова. Всі цикли розкачування валками криволінійної поверхні відбуваються без зміни зазора середньої частини валків від захвата до захвату. Це дозволяє стисненню і здвигу тіста при формуванні валками по ходу розкатки здійснювати плавно від захвату тіста до центру його розкатування з досягненням по всій поверхні пласта однакової товщини. Валки одного і того ж діаметру обертаються з однаковою кутовою швидкістю ω , радіусом R , довжиною L . Робоча поверхня валків знаходиться між зазорами h_0 і h_1 . Де: h_0 – віддаль між поверхнями валків при наявності тіста; h_1 – мінімальний зазор між валками.

При нагнітанні тісто обтискається, в результаті чого товщина шару зменшується, а його довжина і ширина збільшується. Різниця між вхідною h_0 і кінцевою h_1 товщиною шару тіста буде абсолютним стисненням:

$$\Delta h = h_0 - h_1,$$

Різниця між кінцевою b_1 і початковою b_0 шириною шару тіста є абсолютна ширина:

$$\Delta b = b_1 - b_0$$

Величину деформації шару тіста при нагнітанні характеризують наступними показниками (коефіцієнтами):

Відносне обжимання – відношення абсолютного обжимання до вихідної товщини шару;

$$\varepsilon = \Delta h / h_0, \text{ або } \varepsilon = (\Delta h / h_0) \cdot 100\%$$

Коефіцієнт обжимання – відношення вхідної товщини до кінцевої:

$$\varepsilon = h_0 / h_1$$

коефіцієнт розтягування тіста між валками – відношення вхідної довжини шару – l_1 до вихідної довжини l_0 : $\zeta = l_1 / l_0$.

Оскільки об'єм тіста при нагнітанні валками змінюється, то $h_0 l_0 b_0 > h_1 l_1 b_1$, звідки $\zeta = l_1 / l_0 = F_0 / F_1$

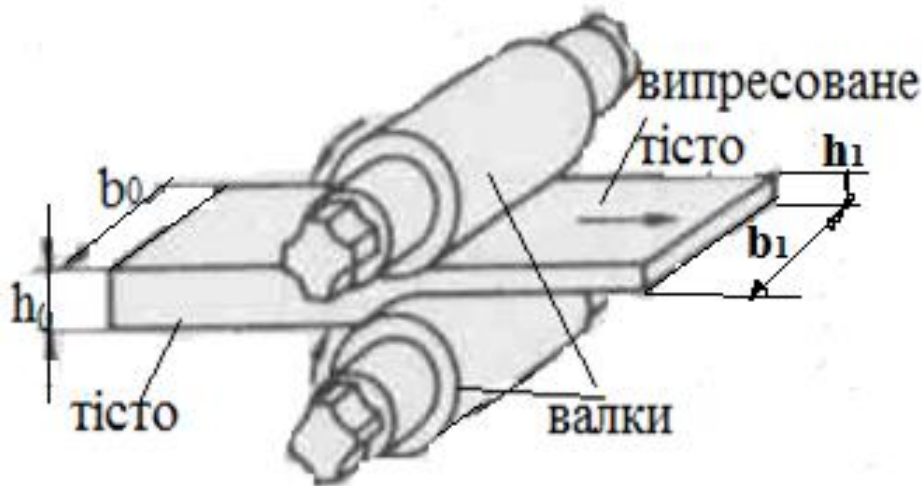


Рис.4.2. Схема розкачування тіста

Таким чином, довжина шару при нагнітанні валками збільшується пропорційно зменшенню його поперечного січення. Коефіцієнт обжимання, розтягування і розширення характеризують висоту, поздовжню та поперечну деформацію тіста. Об'єм тіста обмежений дугами захвату, боковими гранями шару і площиною входу тіста між валками і його виходу, є зона деформації. Довжина зони: $l = \sqrt{R\Delta h}$.

З огляду модельного представлення нагнітання і розкачування необхідне при переході з однієї стадії на наступну починають змінюватись реологічні властивості маси середовища. Видалення маси тіста із зони нагнітання має здійснюватися відразу, так як пружно-пластична деформація позначається на якості кінцевого продукту і призводить до зайвих енерговитрат.

На основі аналізу згаданих процесів можемо скласти рівняння енергетичного балансу для процесу нагнітання маси середовища:

$$\frac{dA_m}{dt} + \frac{dq_1}{dt} + \frac{dq_2}{dt} + \frac{dE_1}{dt} + \frac{dE_2}{dt} + \frac{dE_s}{dt} + \frac{dE_n}{dt} + \frac{dE_{\phi m}}{dt} + \frac{dA_T}{dt} = 0$$

де A_m – робота зовнішніх механічних сил, що прикладена до системи;

q_1 – кількість теплоти за рахунок зовнішніх джерел;

q_2 – кількість теплоти за рахунок внутрішніх процесів (бродиння, окислення хімічні процеси та ін.);

E_1 – приток в систему інших видів енергії (радіаційне випромінювання, конвективний теплообмін, теплопровідність та ін.);

E_2 – енергія, витрачена на деформацію маси середовища;

E_s – енергія, витрачена на утворення вільної поверхні в середовищі в результаті його нагнітання;

E_{Π} енергія, витрачена на пластичну деформацію полідисперсного середовища;

$E_{\phi x}$ – енергія, витрачена на зміну фізико-хімічних властивостей середовища;

dt – час;

dA_T – робота сил зовнішнього тертя маси середовища і робочих валків.

На основі термодинамічного підходу до процесу нагнітання можна зробити припущення, що площа вільної поверхні частини середовища, яка утворилася в результаті його обробки пропорційна кількості енергії, витраченої на його деформування. Рівняння зміни площі вільної поверхні в середовищі можна записати у вигляді:

$$\frac{dE_2}{dt} + \frac{dE_s}{dt} = 0$$

З досліджень процесу інтенсивність поглинання енергії середовищем залежить від наступних параметрів процесу:

$$\frac{dE_2}{dt} = f(Y, S, \Phi, B)$$

де Y – параметр, що відображає фізико-механічні властивості середовища;

S – площа нагнітання (зазору між обертовими валками);

Φ – функціональний параметр, що залежить від форми валків;

B – параметрів зовнішнього середовища.

Фізичний зміст даного рівняння полягає в тому, що інтенсивність деформації маси середовища залежить від способу прикладання механічних

сил, ступеня його попередньої дисперсності (рецептура) і його фізико-механічних властивостей при деформуванні. Останні залежать від накопиченої теплової енергії, витраченої на зміну фізико-хімічних властивостей.

Взаємозалежність інших видів енергетичних потоків можна виразити диференціальними рівняннями, що записуються на основі класичної термодинаміки з врахуванням конструктивно-технологічних параметрів нагнітального вузла. Загалом аналітична модель процесу може бути записана системою диференціальних рівнянь, що відображають динаміку енергетичних потоків в системі «оброблюване середовище – вузол нагнітання – зовнішнє середовище».

Для більш наглядного вигляду і розуміння загального вигляду моделі нами запропонована схема причинно-наслідкових зв'язків між елементами, що визначають параметри процесу (рис. 4.3). Для реалізації математичної узагальненої моделі досить відобразити кожний з елементів у формі залежностей між ними.

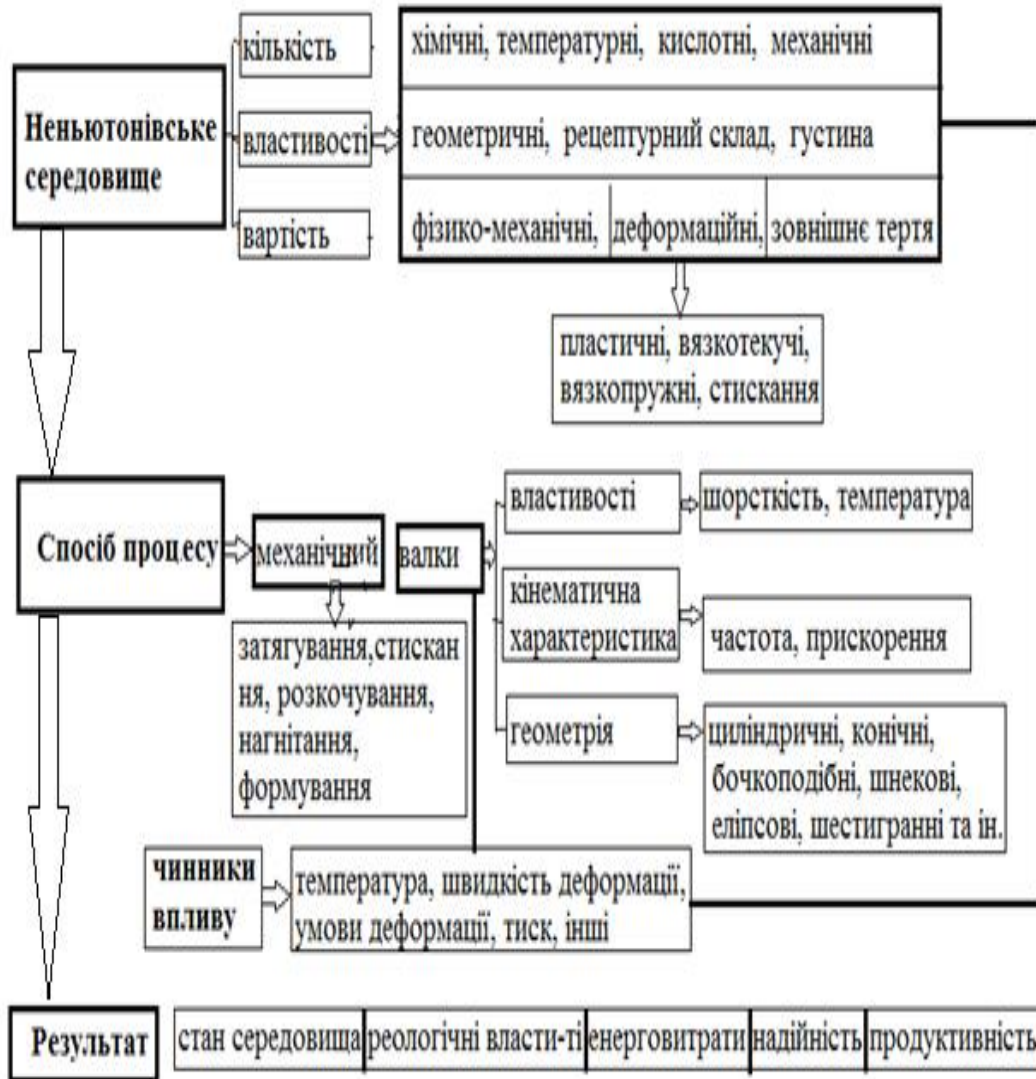


Рис. 4.3. Взаємозв'язок чинників при дії валкових робочих органів

Згідно з схемою, початковими параметрами моделі є хімічні, фізико-механічні і геометричні властивості середовища. При цьому, необхідно в математичній моделі врахувати ті властивості, що впливають на хід процесу розкачування і нагнітання (агресивність по відношенню до валків, температура деструкції, здатність окислюватися, та ін.). Аналітично усі ці показники можуть бути частково представлені у вигляді коефіцієнтів, які є постійними або залежать від динаміки процесу. Фізико-механічні властивості можна подати у вигляді рівнянь реологічних залежностей. Ці властивості представляються критерієм міцності, сил тертя, густини, в'язкості, пластичності та інших необхідних характеристик від чинників, що впливають на ці показники. Геометричні властивості початкового стану маси середовища є фіксованими і визначаються рецептурою.

Спектр механічних способів нагнітання і розкачування досить широкий і вибір параметрів валкових робочих органів не просте завдання. Спосіб, за допомогою якого здійснюється процес, можна аналітично подати у вигляді рівнянь, що визначають геометричні параметри валка, їх характеристику, властивості (шорсткість, кількість пазів, вигляд пазів, температуру) і умови проведення процесу (тиск, зтягування, дискретність, теплообмін тощо).

Процес нагнітання і розкачування механічним способом зручно поділити на стадії: завантажування маси середовища в робочу камеру, зтягування його до початку стиснення, нагнітання, видалення заданої маси із зони обробки валків. Усі ці стадії взаємопов'язані самим процесом, тому неможливо у просторі провести розмежування.

Для розуміння загального вигляду вимог до валкових машин нами запропонована класифікаційна схема причинно-наслідкових зв'язків між параметрами, що визначають принцип їх побудови (рис. 4.4).

Таким чином, для створення математичної моделі процесу нагнітання і розкачування, необхідно обрати спосіб реалізації кожної з вищенаведених стадій і записати рівняння, які описують поведінку середовища на кожній з них.

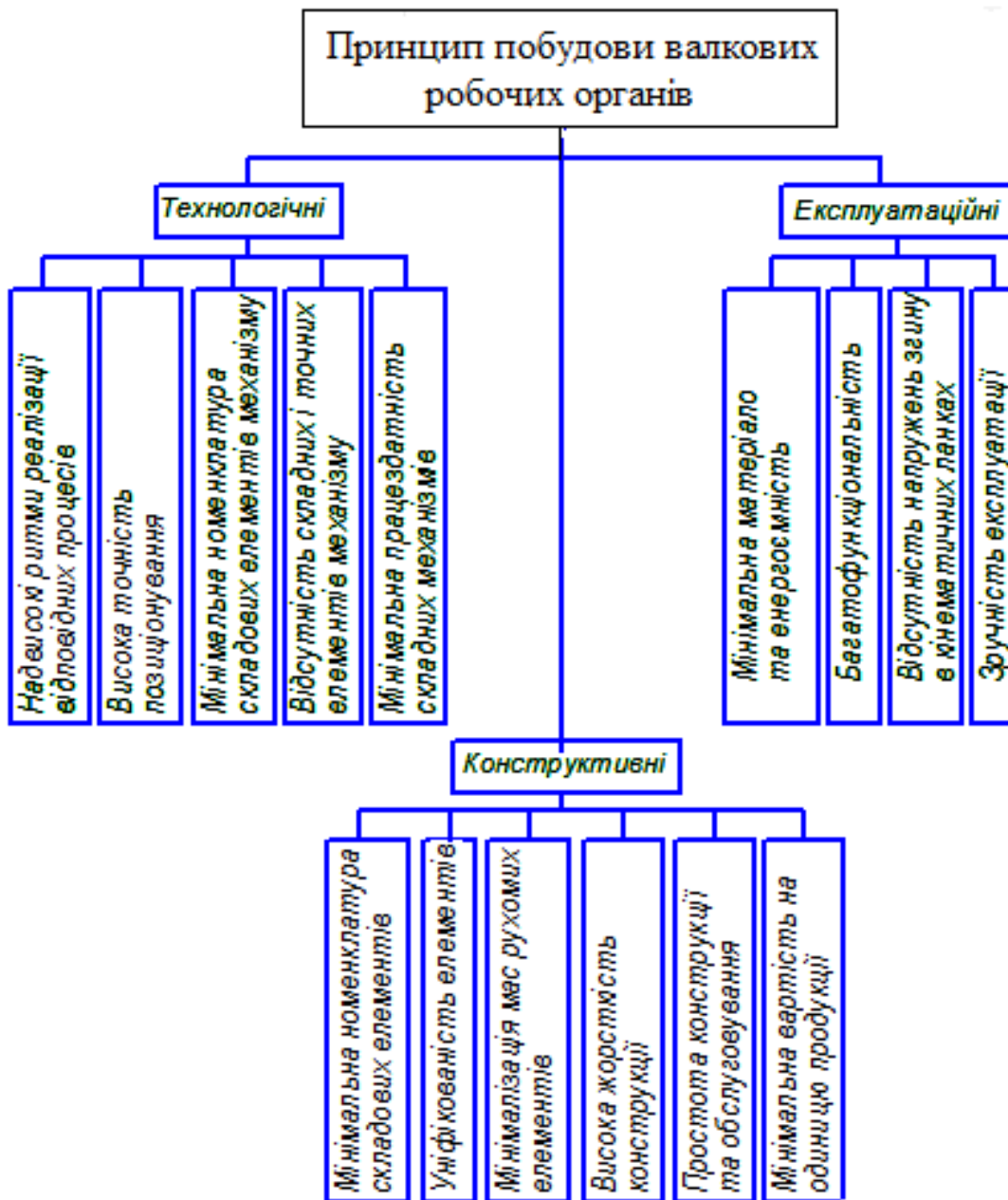


Рис. 4.4. Класифікаційна схема причинно-наслідкових зв'язків між параметрами

Основна проблема в аналітичному описі процесу деформації полідисперсного середовища – це адекватно описати його функціональними залежностями. Його можна описати тільки на основі експериментальних досліджень поведінки середовища у певному виді дії валків.

4.3.1. Оцінка ефективності деформації тіста валками

При проектуванні або модернізації формувальних машин неможливо передбачити кінцевий результат якості дії валкових робочих органів за

допомогою існуючої технології. Вибір того чи іншого валкового робочого органу відбувається інтуїтивно, після чого здійснюється перевірка доцільності цього вибору за допомогою експериментальних досліджень. Для цього, щоб визначити вплив зміни валкового робочого органу на ефективність роботи нагнітання, розкачування, нами проведено глибинний аналіз стану середовища при дії валків, конструктивний аналіз та шляхи удосконалення (див. розділ 1).

Виходячи із фізичної суті механізму формування, характеру розвитку деформації середовища і молекулярно-механічної теорії тертя, розглянуто процес розкачування та нагнітання тіста. Маса тіста, потрапляючи в зону дії валків, має неправильну форму, тому виявити будь-які закономірності процесу на перших секундах не можливо. Деформаційні впливи починають діяти на тісто з моменту утворення течії маси в щілині між валками. Форму течії можна розглядати як розкачування пружно-в'язкого еластичного середовища по несучій поверхні валків.

В процесі розкачування відбувається ковзання тіста по поверхні валків. При зминанні поверхневого шару і його ковзанні по поверхні валка, тісто ущільнюється і відбувається вирівнювання нерівностей. Далі ущільнений шар маси тіста набуває підвищену газо- і формоутримувальну здатність.

Для виявлення міри ефективності різних способів подачі та нагнітання тіста валками необхідно врахувати наступні закономірності:

- особливості дії валків в період підготовки середовища до нагнітання;
- стан середовища безпосередньо в робочій камері машини;
- основні вимоги до конструкції валка.

Не зважаючи на безліч деформацій, що відбуваються при дії валкових робочих органів (стискання, зминання, перемішування, нагнітання, розтягування, зсуву, зрізу та ін.), їх сумарна дія спрямована на здійснення процесу формування.

Розглянемо енергетичний підхід до процесу дії валків на різні середовища, особливо неньютонівські. Деформування структури середовища пов'язане з енергетичною взаємодією джерела енергії і тіста, що піддається дії валків. Перенесення енергії можливе або у вигляді імпульсу сили при безпосередньому контакті, або у вигляді кванта випромінювання. Енергетична дія зовнішніх сил на середовище може супроводжуватися перенесенням маси, теплоти, фізико-хімічними ефектами, адгезійними та ін. Основні способи передачі енергії тістові, на які впливає дія валків, наступні: **масові** – силову дію формують гравітаційні, відцентрові або інерційні сили; **хімічні способи** диспергування – засновані на об'ємному розширенні продуктів хімічної реакції,

або на втраті енергії зв'язку, хімічної реакції, хімічної спорідненості частини матеріалу з основним масивом середовищ. Мікробіологічні способи диспергування засновані на хімічній або ферментативній дії бактерій, плісняви і рослин на середовище; гідродинамічні способи, рушійною силою яких є тиск струменя рідини або газу, або перепад тиску в об'ємі тіста [15, 16].

З вищеперерахованого, класифікація є узагальненим перерахуванням уже відомих методів впливу на тісто, що диспергується. Разом з тим, впорядкування цих способів за дрібнішими ознаками і групами дозволяє визначити «осередки», які не заповнені сьогоdnішнім рівнем знань та передбачити нові шляхи інтенсифікації, диспергування тіста шляхом комбінації вже відомих.

Вирішення основних технологічних і споживчих завдань валкового нагнітання при частковому додатковому змішуванні компонентів в тісті, при його подачі в зону безпосередньої валкової дії (нагнітання) є отримання рівномірної якісної течії в мінімальні терміни, при мінімальних витратах енергії та належної якості. Деяким інтегральним показником додаткового змішування в робочій камері може служити величина [15, 17].

$$\varepsilon = \frac{V \cdot J}{\tau \cdot N},$$

або

$$\varepsilon = \frac{Q \cdot J}{N},$$

де V – об'єм робочої камери в зоні дії валків, м^3 ;

Q – об'ємна продуктивність переміщення з частковим перемішування, $\text{м}^3/\text{с}$;

N – витрати усіх видів енергії на процес, Вт;

J – критерій якості переміщення;

Критерій J може бути визначений із виразу[15]

$$J = \frac{\sigma^2}{S^2}$$

де σ – генеральна дисперсія розподілу ключового компоненту в суміші;

S^2 – дисперсія абсолютно не змішаної системи.

Аналіз якісно-енергетичного показника ефективності додаткового змішування ε показує, що його регулювання можливе шляхом скорочення часу дії валків, або зниженням витрат потужності на процес нагнітання. Таким чином, дія валкових робочих органів, для досягнення максимальної ефективності процесу, повинна відповідати наступним вимогам:

- максимальна кількість поверхонь зсуву, що утворюються за одиницю часу;
- максимальна кількість складових рухів валків, що дозволяють надавати масі середовища поступальне і обертове переміщення відносно площин зсуву і одній навколо іншої;
- адаптивність поверхні валків, що забезпечують мінімальний опір його переміщення в просторі і самовстановлювальний характер миттєвого положення в середовищі під дією зовнішнього опору;
- комбінація різних видів і способів підведення енергії на компенсацію зміни положення часток тіста, розриву внутрішніх зв'язків і дифузійне перенесення;
- плавна швидкість течії маси тіста при не сталому характері руху валків;
- мінімальні витрати на дисипацію енергії в тепло та в'язке тертя.

При вирішенні завдань розкачування маси валками і диспергування окремих компонентів суміші додатковими вимогами до поверхонь валків будуть:

- високі локальні градієнти зсуву і тиску;
- безперервність подачі середовища в зону розкачування і відведення з цієї зони;
- мінімальний адгезійний вплив на тісто.

Для оцінки ефективності роботи валків можна за критерій використовувати коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{A_n}{A_n + A_{np} + A_{nl}}$$

де A_n – робота утворення нової поверхні середовища, Дж;

A_{np} – робота пружної деформації;

A_{nl} – робота пластичної деформації.

Цей показник фізично цілком обґрунтований, оскільки показує відношення корисних витрат енергії до загальних. Разом з тим, практичне застосування критерію ускладнене, оскільки правильно оцінити величину корисних робіт практично неможливо. Для розрахунку A_n у формулі Ребіндера [18] необхідно знати величину коефіцієнта пропорційності K_s , інформація про який також обмежена.

Продуктивність валкових робочих органів, виражена в кілограмах або тонах за годину, не характеризує ефективність їх роботи. В цьому відношенні більш обґрунтовано виражати продуктивність в абсолютному прирості нової поверхні ΔS м²/год. Проте вимір приросту поверхні ускладнений, тому цей приріст виразимо через характеристики матеріалу середовища і продуктивність валків. Питому поверхню дисперсного середовища S_d визначають за формулою [19]:

$$S_d = \frac{S_M}{V_M} = \frac{n6\pi d_e^2}{n\pi d_e^3} = \frac{6}{\psi \cdot d_e}, \quad (4.5)$$

де S_M зміна сумарної площі поверхні середовища за одиницю часу м²/с;

V_M об'ємна продуктивність, м³/с; ψ чинник форми бульбашок в середовищі;

n – кількість бульбашок.

Враховуючи те, що діжджове тісто має у своїй структурі газові бульбашки, тому їх кількість і розміри визначають енергію, структурно-механічні властивості, його газопроникливістю.

Величина утворених бульбашок в кожний момент часу буде залежати від рівноваги його розтягуючих сил:

$$P_p = \pi \rho r^2$$

і стискаючих сил:

$$P_c = 2\pi r\sigma$$

де ρ, π, r, σ – відповідно густина, радіус, поверхневий натяг бульбашки.

При наявності відповідного збиткового тиску і середнього розміру газових бульбашок можна розрахувати швидкість їх підймання по закону Стокса.

Враховуючи вище приведене та постійну зміну площі, а це швидкості руху тіста під дією валків, запишемо рівняння для визначення величини його швидкості:

$$V = 2gr^2(\rho_2 - \rho_1) / 9\eta$$

де g – константа гравітації;

η – ефективна в'язкість тіста;

$\rho_1 \cdot i \cdot \rho_2$ – густина газу і тіста.

Дане рівняння має практичне значення, що дозволяє встановити залежність швидкості збільшення площі тіста від густини і в'язкості, розмірів окремих бульбашок. Це також визначає енергію зміни середовища. Підрахована по рівнянню швидкість зміни об'єму пшеничного тіста із борошна першого сорту густиною 1.2 із середнім радіусом пор 1мм [12] і в'язкістю 10^4 Па с, складає 10 мм/хв.

Визначаючи з формули (4.5) S_M , отримуємо:

$$S_M = \frac{6V_M}{\psi d_e} \text{ або } S_M = \frac{6G_M}{\psi d_e \rho_M}$$

де ρ – густина середовища, кг/м³;

G_M – масова продуктивність, кг/с;

V_M – об'ємна продуктивність, м³/с.

4.4. Класифікаційні ознаки способів і засобів подачі тіста у формувальній машині

Розвиток хлібопекарської та кондитерської промисловості у світі свідчить, що сьогодні пріоритет мають технології, які забезпечують максимальне зберігання у готовому виробі харчові властивості сировини. Особливо це стосується борошняних виробів, термічна обробка яких приводить до значних втрат харчових властивостей.

Сучасні тенденції формування напівфабрикатів із борошняного тіста диктують вимоги до рішення наукових і науково-технічних проблем. Удосконалення технологічного процесу нагнітання, розкачування маси середовища при допомозі валків можливо тільки за умови оптимізації наукових досліджень з подальшим оперативним впровадженням їх результатів у промис-

ловість. Ефективну роль у виконанні цих умов відіграє моделювання. Отже, ефективність будь якого технологічного процесу залежить від правильного вибору, врахування властивостей і поведінки оброблюваного середовища при виконанні над ним нагнітання та розкачування. На основі цього можливо максимально точного прогнозувати результати його обробки. За необхідності, використовувати при технологічних режимах процесу з відповідними уточненнями, що забезпечать необхідну якість і максимальну продуктивність обробки.

Нажаль, теоретичні підходи до прогнозування результатів нагнітання та розкачування, як узагальненої системи пізнавальних засобів, методів і прийомів, що забезпечують належну ефективність процесу, до теперішнього часу не розроблені в повному обсязі для жодної групи біополімерів. Є лише окремі рекомендації з вибором оптимальних конструктивних параметрів робочих органів машин і режимів для обмеженої кількості середовищ з відповідною рецептурою, що вкрай недостатньо для розвитку формувального обладнання.

Особливістю технологічного процесу бубликових, пряникових виробів є велика різновидність технологій приготування переробної сировини і напівфабрикатів за структурно-механічними властивостями і видами їх форми. Ці особливості визначають складність рішення задач механізації технологічних процесів і вимагають системного підходу до аналізу. Тому мета моделювання даних процесів – розробка таких теоретичних і експериментальних засобів, що можуть бути застосовані при синтезі і проектуванні обладнання з валковими робочими органами для розкачування та нагнітання з різними механічними і реологічними властивостями.

Аналіз способів і устаткування для розкачування і нагнітання в'язкого середовища показав, що на даний час запропоновано структурні схеми машин з використанням валків, які розрізняються за способом механічної дії, станом середовища, принципом організації процесу (періодичний, неперервний), конструкцією машини і робочих органів, способом завантаження і видалення заготовки із зони нагнітання (зазору) див. розділ 1. Характерною особливістю всіх запропонованих класифікаційних схем є те, що в їх основу покладено поділ способів і вузлів за дискретними ознаками: нагнітання при низьких і підвищених температурах; обробка в'язко-пружно-пластичних середовищ, застосування зсувної дії валкових робочих органів тощо.

Тому для узагальнення класифікації способів машин з валковими робочими органами потрібно визначити ті дискретні ознаки, що характеризують їх якість процесу. Вони можуть бути описані безперервними функціями їх змін в залежності від виду середовища і технологічних умов, і ті загальні ознаки, які

неможливо подати, як безперервні при їх мінімальній кількості. Тільки на основі такої класифікації можливе створення узагальненої математичної моделі.

В результаті аналізу процесів, що відбуваються при дії обертових валків на середовище в робочій камері встановлено, що їх дискретними ознаками є лише структурні схеми, що визначають характер руху середовища під час технологічної обробки і відповідно наступні основні параметри, які можуть бути описані безперервними функціями:

- Геометричні і кінематичні параметри валкових робочих органів;
- Характеристики середовищ (їх рецептура);
- Фізико-механічні властивості середовища в залежності від технологічних умов (температура, швидкість і умови деформації).

При взаємодії поверхонь валкових робочих органів з середовищем виконується робота:

$$A_P = A_{ДЕФ} + A_{ТЕР}$$

де $A_{ДЕФ}$ і $A_{ТЕР}$ – відповідно, частина роботи, витраченої на деформації та подолання сил тертя.

Коефіцієнт корисної дії робочого органу:

$$\eta_P = \frac{A_{ДИФ}}{A_P}$$

Елементарні акти утворення вільної поверхні сформованого тіста після проходження зазору між валками можливі в межах:

$$V_P = S_a l_a$$

де V_P – об'єм області можливого нагнітання середовища;

S_a – площа перетину робочої камери між валками у напрямку нормалі до відносної швидкості основного потоку середовища і робочих органів;

l_a – довжина області дії валків.

Очевидно, що геометричні параметри валків характеризують потенційну інтенсивність технологічної дії на тісто, яка перш за все, визначена їх ступенем охоплення середовища в об'ємі робочої камери (рис. 4.5). Цю потенційну інтенсивність можна записати виразом:

$$I_0 = \frac{S_a}{\sum S_p}$$

де $\sum S_p$ – загальна площа фракційного контакту валкових робочих органів з середовищем.

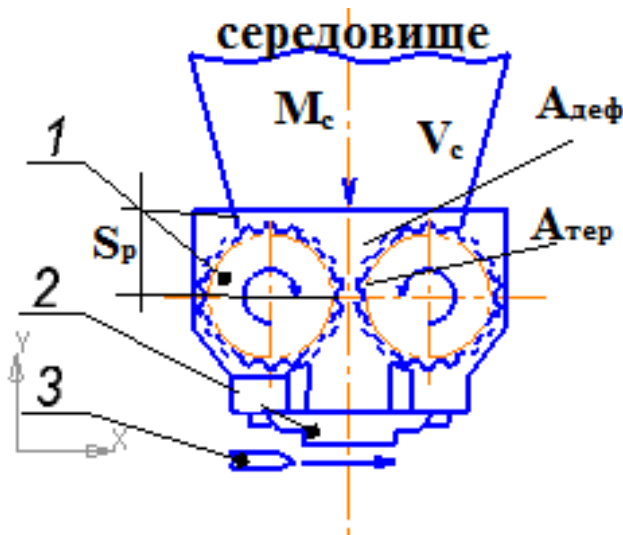


Рис. 4.5. Схема взаємодії валків в робочій камері із середовищем:
1 – обертовий валок; 2 – робоча камера; 3 – формувальний пристрій

Ступінь заповнення робочої зони між валками буде знаходитися в межах:

$$0 < \frac{M_c(t)}{V_n} \leq 1$$

де $M_c(t)$ – маса середовища в робочій камері в даний момент часу;
 V_n – об’єм робочої камери.

Тоді дійсний коефіцієнт інтенсивності технологічної дії:

$$I_d = I_0 \frac{M_c(t)}{V_n}$$

Опір тіста залежить від його механічних властивостей як суцільного середовища і його рецептури. Для досягнення початку нагнітання і розкачування суцільного бездефектного об’єму $V_{сер}$ нашого середовища потрібно виконати роботу:

$$A = [\varepsilon] \cdot v_{сер}$$

де $[\varepsilon]$ – граничне значення питомої роботи деформації, перевищення якого супроводжується скиданням механічної енергії на утворення формованої поверхні.

Наступне прирощення роботи деформування призводить до утворення формувальної маси середовища для подальших технологічних процесів, яке визначається через утворену площу:

$$dS_{\phi} = \frac{dA}{\varepsilon^s}.$$

де ε^s – питома енергія утворення одиниці площі вільної формованої поверхні середовища (Дж/м²).

Початкові умови для розв’язання рівняння по визначенню площі вільної формованої поверхні середовища, будуть:

$$S=0 \text{ при } A = [\varepsilon] \cdot v_{сер}$$

Така оцінка інтенсивності дії валкових робочих органів на тісто буде справедливою для всіх нових видів конструктивних параметрів машин.

Кінетичні характеристики валкових робочих органів можуть бути описані рівняннями руху, а характеристики середовища можна подати за допомогою функції зміни стану. Опір деформування, міцність і сили тертя та їх залежність від температури, швидкості та умов деформування можна описати на основі експериментальних досліджень та теоретичних відомостей з фізики і механіки полімерів.

Для визначення характерних ознак валкового вузла у формувальних машинах, що мають дискретний характер, нами розглянуто та проаналізовано можливі структури потоків тіста. Він складає математичний опис гідродинамічної структури, що дає особливі можливості для визначення ефективності роботи валків, конструкції яких нами розроблені. Враховуючи дію валкових робочих органів на середовище, можливі їх такі структурні потоки:

За моделлю ідеального витиснення незалежно від складних реальних потоків руху тіста, що рухається до зони витиснення через зону прямолінійної обробки, не змінюється. Час перебування в технологічній зоні буде:

$$t = \frac{V_{з.нз}}{V_{np}}$$

де $V_{з.нз}$ – об'єм зони нагнітання;

V_{np} – об'ємна продуктивність потоку середовища (тіста).

Швидкість зміни властивостей такого ідеального потоку:

$$\frac{dc}{dt} = -v \left(\frac{dc}{dx} \right)$$

де c – досліджуваний параметр;

v – лінійна швидкість потоку;

x – координата переміщення.

За моделлю повного перемішування в усіх точках об'єму зони обробки середовища властивості його однакові і рівні їх значенню на виході:

$$\frac{dc}{dt} = \left(\frac{V_{np}}{V_{нз}} \right) (C_{наг} - C_{вих})$$

У реальних випадках час перебування маси середовища у потоці різний і відрізняється від середнього часу, який можна визначити за рівнянням. Це явище можна описати з використанням дифузійної та осередкової моделей.

За дифузійною моделлю перемішування маси тіста в потоці у напрямі його руху описується виразом, формально відповідним закону молекулярної дифузії Фіка [1, 2]. По аналогії з коефіцієнтом молекулярної дифузії в законі Фіка ступінь поздовжнього перемішування у дифузійній моделі характеризується коефіцієнтом поздовжнього перемішування D_L :

$$\frac{dc}{dt} = -v \left(\frac{dc}{dx} \right) + D_L \left(\frac{d^2c}{dx^2} \right)$$

Як і в моделі ідеального витіснення, профіль швидкостей маси середовища в перпендикулярному перетині зони обробки – однаковий. Коефіцієнт поздовжнього перемішування враховує часткові чинники, які викликають змінну нерівномірну структуру потоку.

Осередкова модель структури потоку дозволяє врахувати й інші особливості руху потоку середовища. За цією моделлю складаються з послідовно сполучених n осередків повного перемішування. В цій моделі n -єдиний параметр, за допомогою якого характеризується ступінь нерівномірності розподілу маси потоку середовища за часом перебування в моделі. Дана модель з дифузійною не дозволяє адекватно відобразити складні явища, якими є рух середовища між валками.

Області застосування вище згаданих моделей безумовно залежать від геометричних параметрів робочої камери, валків, фізико-механічних та реологічних властивостей тіста і режимів обробки.

Відносний рух середовища і валків може бути простим і складним. По мірі переміщення середовища відносно робочих органів є деякою функцією координати x . Цей вид функції визначається конструктивними і технологічними параметрами формувальної машини.

Традиційні способи дії валків в зазорі на середовище в основному базуються на комбінації двох методів деформаційного навантаження – стисканні у квазістатичному динамічному режимах, причому весь об'єм деформується. Аналіз напруженого стану середовища в робочому об'ємі валкового вузла для кожної моделі можна отримати чисельним методом розрахунку. Можливість розрахунку поля напружень у робочій зоні між валками дає підхід до вирішення проблеми аналітичної інтерпретації процесу нагнітання та розкачування окремої маси середовища на підґрунті пластичного руйнування.

Підхід до вирішення проблеми розробки методів розрахунку руху маси середовища між валками може бути оснований на використанні напівемпіричних законів, статистичних даних за видами валків і на розрахунковому полі діючих на середовище сил у робочій зоні конкретного вузла. При цьому порядок досліджень може бути наступним:

- За розрахунковим полем напружень і деформацій визначається енергія, що передається масі середовища у валковому вузлі;
- З використанням закономірностей нагнітання і розкачування, емпіричних і статистичних даних визначаються особливості процесу;
- Проводяться спеціальні експерименти для уточнення закономірностей у конкретній машині з валковими робочими органами.

Оскільки параметри процесу дії валків в першу чергу залежать від фізико-механічних і хімічних властивостей середовища, які відповідно можуть реагувати на температуру, тиск, швидкість деформації та інші чинники, то аналітичний опис процесу можливий на основі математичної моделі, яка до певної

міри їх враховує. Основним показником ефективності кінцевого результату може бути кількість енергії, витраченої на утворення одиниці площі вільної поверхні середовища після дії валків. Крім цього показниками кінцевого результату є якість, продуктивність, інтенсивність спрацювання робочих органів, тощо.

При розтягуванні середовища накопичується потенційна енергія деформації, співрозмірна з роботою зовнішніх сил по роз'єднанню атомних площин. Надмірна пружна деформація накопичується в процесі навантаження середовища, а потім переходить у тепло. Енергоємність надмірної деформації особливо велика при дефектах валків, порушенні рецептури. Таким чином необхідно забезпечити дію валків при нагнітанні і розкачуванні так, щоб зберігти високу продуктивність технологічного процесу. Важливо знизити витрати енергії на пластичну деформацію за рахунок вибору оптимального співвідношення між навантаженням, швидкістю деформації і тривалістю навантаження.

4.4.1. Методика визначення параметрів середовища на поверхні валків

Згідно аналізу роботи процесу нагнітання, розкачування, транспортування в'язкого середовища з найбільш досконалими і перспективними з точки зору енергоємності робочих процесів, надійності роботи і умов обробки маси являються валкові машини [6, 12].

Розглянуті процеси реалізуються у формувальній машині по виробництву сушки, бубликів. Для визначення взаємозв'язку між параметрами процесів нами проаналізовані всі деформації та механічні властивості тіста між технологічними операціями.

Принцип дії валків (з пазами) розглядали як самовсмоктувальний насос, що дозволяє захвачувати середовище з робочої камери та подавати її в зазор між валками. В умовах експлуатації – опис процесу можна розглядати як гідродинаміку руху середовища, що підлягає зміні його параметрів у залежності від поля швидкостей та структурно-механічних характеристик. Принципово такий підхід моделювання досить коректний тому, що спостерігатимуться структура та форма течії, що аналогічні робочим умовам із затягуванням, стисканням та розкачуванням (нагнітанням) середовища. Витіснення середовища, що стискується, буде замикатися на течії у міжвалковому зазорі.

Аналіз математичної моделі валкового робочого органа у рамках цієї роботи виконується на основі теоретичних та експериментальних досліджень. Тому моделювання робочого процесу течії для будь-яких підходів та

алгоритмів у кінцевому підсумку пов'язаний із розв'язанням трьох головних задач:

1) визначення геометричних параметрів, що забезпечують необхідний функціональний взаємозв'язок $\dot{V} = f(p_{ec})$ (об'ємної продуктивності та тиску зтягування) для режиму роботи першого етапу подачі середовища із робочої камери на валки або $\dot{V} = f(p_n)$ (об'ємної продуктивності та тиску розкачування) для робочого режиму нагнітання;

2) описання форми поверхні розподілу робочих середовищ;

3) визначення споживаної (або питомої) потужності вузла нагнітання формувальної машини.

Перша задача, як правило, зводиться до вибору параметрів, що описують теоретичну продуктивність та розрахунку коефіцієнта подачі, як функції від тиску зтягування або відношення тисків.

Друга задача вимагає знаходження залежності радіуса-вектора внутрішньої поверхні середовища за кутом повороту робочого валка в інтервалі

$$\varphi = 0 - \frac{\pi}{2}.$$

Найбільш складною у загальній концепції моделі є третя задача, а рівень її складності залежить від точності визначення насамперед гідродинамічних втрат. Здебільшого розходження існуючих моделей робочого процесу течії середовища в зазорі між валками різних авторів пов'язані саме із підходами до розрахунку розподілу швидкостей руху рідини на цій ділянці [10]. Він базується на опублікованих результатах комплексних досліджень, які можна розглядати як замкнену модель робочого процесу.

В даній моделі формулюється концепція моделювання, дається достатньо повний опис алгоритму та розв'язання зазначених трьох задач. Для таких робіт переважно характерне уточнення розрахункових методик, що базуються на тих чи інших алгоритмах основних задач загальної моделі течії ньютонівської та неньютонівської рідин.

Наша побудова математичної моделі базується на таких припущеннях:

1) робота валкових робочих органів відбувається в стаціонарному режимі. Тобто, незмінність у часі дискретної дії при зтягуванні середовища в робочу зону камери при вході в зазор між валками та виході з нього. Відсутність пульсацій тиску, а також сталість температур середовища, що

надходить у бункер машини, та температури навколишнього середовища. Крім того, частота їх обертання також незмінна в часі;

2) поверхня робочих валків знаходиться у контакті з середовищем при будь-якому куті їх повороту. Як показують теоретичні та експериментальні дослідження, у нормально працюючій робочій камері з валковими робочими органами, що випускається у наш час національною промисловістю України, ця умова виконується під час роботи формувальних та тістоподільних машинах на регламентованих режимах;

3) відсутні перетікання робочого середовища по торцях валків. Це припущення беремо для спрощення розрахунку картини руху середовища, але при розрахунках витратних характеристик течії середовища враховуємо;

4) лінії струму середовища у серпоподібному міжвалковому просторі є еквідистантними до їх робочої поверхні, а внутрішня поверхня середовища у межах одного циклу має прямокутну форму. Відповідно до експериментальних досліджень більша частина середовища має помітний нахил поверхні у зоні, що відповідає його нагнітанням та частково всмоктуванню;

5) витрата середовища через будь-який радіальний переріз між валкового простору однакова. Це припущення базується на малій об'ємній витраті робочого середовища, що подається у зазор, порівняно з витратою середовища у робочій камері через радіальний переріз машини (не більше 0,3%), а також на нехтуванні перетікань середовища по торцях валків;

6) тиск середовища на зовнішню поверхню валків у межах однієї дискретної дії та при фіксованому куті повороту останнього однаковий. Оскільки максимальна відносна швидкість руху середовища у робочій камері мала, нерівномірністю розподіленням тиску по об'єму камери можна знехтувати;

7) рух робочого середовища по поверхні валків безвідривний. Насправді можуть спостерігатися зони на внутрішній стінці корпусу камери, а також рух поблизу валків. Іноді супроводжується відривними явищами. Ці явища повинні враховуватися відповідними коефіцієнтами.

В описуваній моделі однією з основних величин є швидкість потоку середовища вздовж характерного його струменя у серпоподібному валковому просторі машини. У загальному випадку швидкість потоку середовища в просторі між валками є векторною функцією $C = \vec{C}(\varphi, r, z)$, що задана у полярних координатах, і залежить від кута повороту, радіуса та відстані від торцевої стінки.

Припускаючи, що зміна витрати середовища в просторі між валками у межах кута повороту $d\varphi$ відбувається за рахунок надходження середовища з робочої камери, диференціальне рівняння [7, 15]

$$\frac{dq}{d\varphi} = (1 - \tau_2) \cdot w_{R_2},$$

де $q = \dot{Q}_{FL} / (u_2 \cdot B_2)$ – безрозмірна витрата середовища через радіальний переріз валкового простору;

τ_2 – коефіцієнт стиснення потоку на радіусі R_2 (без урахування відривних явищ);

$w_{R_2} = W_{R_2} / u_2$ – радіальна (витратна) складова абсолютної швидкості на виході з робочого валка, віднесена до швидкості u_2 .

Загальне рівняння математичної моделі подане у вигляді нелінійного диференціального рівняння вигляду

$$A \cdot \frac{dq}{d\varphi} + B = 0,$$

де $A = A(q; \varphi)$ та $B = B(q, \varphi)$ – функції, що записані на основі рівнянь витрати рідини та газу для визначення зміни моменту кількості руху рідини елементарного об'єму в безлопатевому просторі за кутом повороту. Чисельне інтегрування даного рівняння виконувалося з використанням схеми Мерсона – різновиду явної однокрокової схеми Рунге-Кутта.

Модель, що розглядається, дозволяє розрахувати розподіл середньої швидкості та тиску потоку середовища в безлопатевому валковому просторі. Отримані дані використовуються для розрахунку теоретичної продуктивності та споживаної потужності. Введення в модель критеріальних та безрозмірних комплексів дозволило спростити та уніфікувати процедуру розв'язання достатньо громіздкої системи рівнянь.

4.4.2. Розрахункова модель поведінки тіста у пазах формової поверхні валків

1. *Початкові положення.* Як відомо, валок – це циліндр з пазами на його поверхні, що обертається. Тому робочий валок можна розглядати як колові лопатеві рихлі, що зв'язані жорстким циліндричним контуром по кореневих перерізах.

Розглянемо робочий валок, що обертається зі сталою кутовою швидкістю ω у тісті, що обмежений зовнішнім нерухомим контуром робочої камери. При

цьому маємо на увазі, що тісто частково заповнює порожнину лопатевих рихлів при обертанні. У випадку концентричного розташування пазів на поверхні валка відносно зовнішнього нерухомого контуру маємо циркуляційний рух тіста навколо центра обертання та поверхні межі розділення середовищ «рідина – рідина», яку називають внутрішньою поверхнею рідинного кільця. Вона є циліндричною відносно осі обертання валка.

Відносно центра обертання пазів картина течії середовища змінюється. Вона змінюється не тільки у пазах, але і на гладкій поверхневій зоні валка. Середовище, що бере участь у дискретному русі між валками з пазами, отримує можливість переміщення у радіальному напрямі виключно за рахунок зсування маси в робочій камері. Зсув маси тіста виникає завдяки контакту маси тіста й поверхні валка та їх тертя. Ці процеси приводять до затягування маси, яка ніби утворює ексцентрисит.

Таким чином, в ексцентрично розташованому тісті виникає змінна за величиною і знаком радіальна складова абсолютної швидкості, яка зумовлена дією відцентрових сил і характером зміни обмежувального контуру камери відносно осі обертання.

Отже, наявність ексцентриситету трансформує положення поверхні середовища на валках. Визначення цього положення відносно центру обертання – становить одну з головних задач розрахунку валкових робочих органів.

2. *Рівняння форми поверхні середовища на валку при обертанні.* Припускаючи конгруентність ліній струму у відносному русі щодо поверхні робочого паза на поверхні циліндричного валка, величина радіальної складової абсолютної швидкості у точці потоку в області гладкої поверхні валка за його периферійним радіусом (рис. 4.6) визначається за виразом

$$v_{r_2} = \left(v_{r_2} \right)_{\varphi=0} + \omega \cdot \frac{dh}{d\varphi}, \quad (4.6)$$

де $\left(v_{r_2} \right)_{\varphi=0}$ – радіальна складова абсолютної швидкості у перерізі 0–0;

h – поточний радіальний зазор у області гладкої поверхні (без паза);

φ – величина кута повороту, яка відраховується від перерізу 0–0 у напрямі обертання робочого валка.

У свою чергу, величина зазору h на початковій стадії затягування маси середовища до простору його стискання валками, визначається геометричним співвідношенням у вигляді

$$h = \sqrt{R^2 + e^2 - 2 \cdot R \cdot e \cdot \cos \varphi} - r_2, \quad (4.7)$$

де R – радіус внутрішньої поверхні циліндричного валка;
 e – утворений ексцентриситет масою тіста;
 r_2 – периферійний радіус робочого валка з тістом.

Продиференціювавши рівняння (4.7), маємо

$$\frac{dh}{d\varphi} = \frac{e \cdot R \cdot \sin \varphi}{\sqrt{R^2 + e^2 - 2 \cdot e \cdot R \cdot \cos \varphi}}. \quad (4.8)$$

З урахуванням умови $(v_{r_2})_{\varphi=0} = 0$ отримаємо:

$$v_{r_2} = \frac{\omega \cdot e \cdot R \cdot \sin \alpha}{\sqrt{R^2 + e^2 - 2 \cdot e \cdot R \cdot \cos \alpha}}. \quad (4.9)$$

Рівняння (4.9) показує, що на радіальну складову потоку, що виникає на початковій стадії затягування поверхнею валка з боку нерухомого контуру маси середовища, накладається умова синусоїдальності. Вона відповідно призводить зміну стаціонарності за кутом повороту всієї маси при абсолютній швидкості середовища.

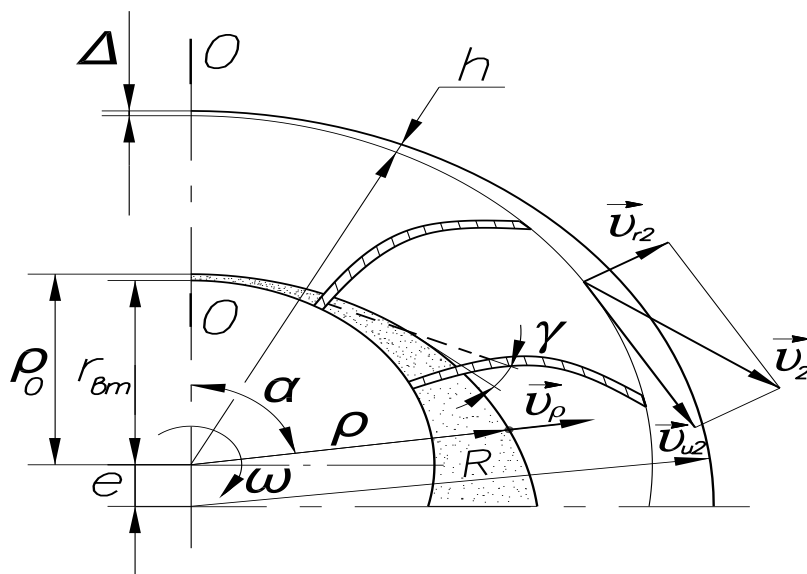


Рис. 4.6. Розрахункова схема

Перш ніж перейти до складання рівняння форми поверхні середовища відносно валка, припустимо, що тиск середовища за кутом повороту є сталою величиною, що відповідає умові режиму роботи валків.

З умови нерозривності радіального потоку в межах робочого валка маємо (за умови, що ширина робочого валка збігається з шириною корпуса, тобто $b = b_2$):

$$v_{r_2} \cdot r_2 d\varphi = v_r \cdot \left(r - \frac{\delta \cdot z}{\frac{\pi}{2}} \right) d\varphi, \quad (4.10)$$

де v_r – радіальна складова швидкості тіста на радіусі робочого процесу r , яка відповідає напруженню зрушення в обертовому русі валка – $\tau = \mu \frac{-d\omega}{dr}$;

z – число пазів робочої поверхні валка;

δ_n – товщина паза по колу радіусом r ;

μ – в'язкість середовища.

Вводячи коефіцієнт затиснення потоку середовища валками

$$K = 1 - \frac{z \cdot \delta}{2 \cdot \pi \cdot r}, \quad (4.11)$$

запишемо рівняння (4.10) у формі

$$v_{r_2} = K \cdot \bar{r} \cdot v_r \cdot \tau_r, \quad (4.12)$$

де $\bar{r} = r / r_2$ – поточний відносний радіус у межах робочого валка;

τ_r – напруження зрушення на поверхні валка $\tau_r = \xi \cdot \rho_m \cdot \frac{v_0^2}{2}$;

ξ – коефіцієнт гідравлічного затягування середовища (0.3...0.5);

v_0 – початкова швидкість руху середовища.

Позначивши через ϕ радіус-вектор внутрішньої поверхні середовища, запишемо рівняння (4.12) для граничного випадку, коли маємо поверхню розділення середовищ

$$v_{r_2} = \tau_\phi \cdot \bar{\phi} \cdot v_\phi, \quad (4.13)$$

де v_ϕ – радіальна складова абсолютної швидкості середовища на радіусі ϕ ;

τ_ϕ – коефіцієнт затиснення на радіусі ϕ ;

$\bar{\phi} = \phi / r_2$ – відносний радіус внутрішньої поверхні шару середовища.

У свою чергу, залежність для радіальної складової абсолютної швидкості на внутрішній поверхні середовища може бути описана рівнянням

$$v_\phi = (v_\phi)_{\phi=0} + \omega \frac{d\phi}{d\varphi}, \quad (4.14)$$

де $(v_\phi)_{\phi=0}$ – радіальна складова абсолютної швидкості у перерізі 0-0, яка

відповідає $\tau_r = \xi \cdot \rho_m \cdot \frac{v_0^2}{2}$.

Тоді рівняння (4.13) можна записати таким чином

$$v_{r_2} = \tau_\phi \cdot \bar{\phi} \cdot \omega \frac{d\phi}{d\varphi}. \quad (4.15)$$

З урахуванням рівняння (4.8) отримаємо основне диференціальне рівняння валкового впливу на середовище

$$\tau_\phi \bar{\phi} \cdot d\bar{\phi} = \frac{\bar{e} \cdot R \cdot \sin \varphi}{\sqrt{R^2 + e^2 - 2 \cdot e \cdot R \cdot \cos \varphi}} d\varphi, \quad (4.16)$$

або у безрозмірних величинах

$$\tau_\rho \bar{\phi} \cdot d\bar{\phi} = \frac{\bar{e} \cdot \sin \varphi}{\sqrt{1 + \bar{e}_R^2 - 2 \cdot \bar{e}_R \cdot \cos \varphi}} \cdot d\varphi, \quad (4.17)$$

де $\bar{e} = e / r_2$ – відносний ексцентриситет утворений шаром середовища на поверхні робочого валка по радіусу r_2 ;

$\bar{e}_R = e / R$ – відносний ексцентриситет на валку по радіусу R .

Інтегрування рівняння (4.17) ускладнюється тим, що коефіцієнт стиснення є також функцією від відносного радіус-вектора внутрішньої

поверхні шару середовища, тобто $\tau_\phi = f(\phi)$. Тому будемо розглядати випадки розв'язання рівняння (4.17), коли коефіцієнт стиснення змінюється по радіусу, тоді τ_ϕ подаємо у вигляді

$$\tau_\phi = 1 - \frac{a}{\phi}, \quad (4.18)$$

де $a = z \cdot \sigma / (2 \cdot \pi \cdot r_2)$ – коефіцієнт, що враховує вплив геометричних параметрів робочого валка.

Для окремого випадку, коли $a = \text{const}$, зважаючи, що $\sigma = \text{const}$, яка відповідає радіальним пазам сталої товщини, рівняння (4.17) після інтегрування має вигляд:

$$\frac{\bar{\phi}^2}{2} - a \cdot \bar{\phi} = \frac{\sqrt{R^2 + e^2 - 2 \cdot e \cdot R \cdot \cos \varphi}}{r_2} + C, \quad (4.19)$$

де значення сталої інтегрування C беремо із граничних умов, коли $\varphi = 0$; $\bar{\phi} = \bar{\phi}_0$.

Тут $\bar{\phi}_0 = \phi_0 / r_2 = (r_1 + h_0) / r_2$ – відносний радіус положення внутрішньої поверхні шару середовища у перерізі 0-0.

В ідеальному випадку ϕ_0 дорівнює радіусу робочого валка r_1 .

У результаті отримаємо

$$\bar{\phi} = a + \sqrt{\left(\bar{\phi}_0 - a\right)^2 - \frac{2}{r_2} \cdot \left[R - e - \sqrt{R^2 + e^2 - 2 \cdot e \cdot R \cdot \cos \varphi} \right]}, \quad (4.20)$$

де перед радикалом беремо тільки знак плюс, якому відповідає фізичне значення даного рівняння.

У безрозмірному вигляді рівняння (4.20) можна записати так:

$$\bar{\phi} = a + \sqrt{\left(\bar{\phi}_0 - a\right)^2 - 2 \cdot \bar{R} \cdot \left[1 - \bar{e}_R - \sqrt{1 + \bar{e}_R^2 - 2 \cdot \bar{e}_R \cdot \cos \varphi} \right]} \quad (4.21)$$

де $\bar{R} = R / r_2$ – безрозмірний радіус.

З отриманих рівнянь бачимо, що положення внутрішньої поверхні середовища для фіксованого значення кута повороту визначається такими

безрозмірними параметрами: відносно утворених ексцентриситету \bar{e} та \bar{e}_R ; відносний радіус внутрішньої поверхні у перерізі 0–0 $\bar{\phi}_0$; відносний радіус валка \bar{R} ; коефіцієнт впливу геометричних параметрів робочого валка a . Отже, ці п'ять параметрів повинні бути визначальними при будь-яких експериментальних дослідженнях валків.

Використання ЕОМ при розрахунку валків дозволяє проаналізувати вплив кожного зі вказаних трьох параметрів на положення внутрішньої поверхні середовища.

Як показано на рис. 4.7, більш наближеною до реального значення валків є форма, розрахована за рівнянням (4.19), тобто для випадку змінного значення за радіусом коефіцієнта стиснення.

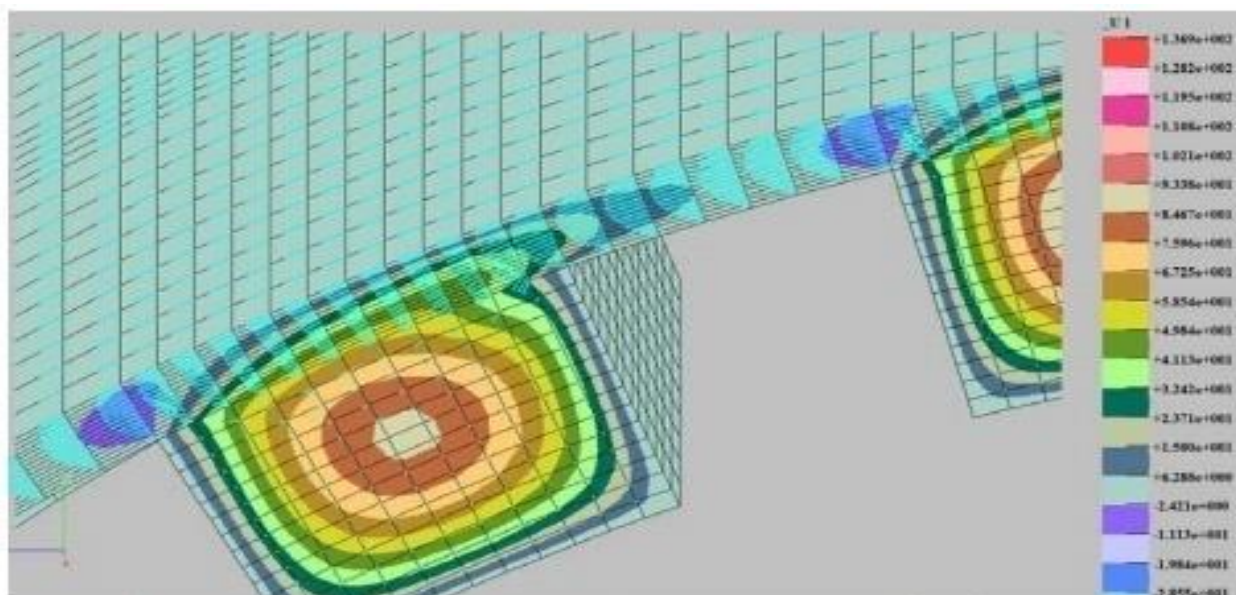


Рис. 4.7. Епюра розподілу швидкостей руху середовища в сегменті валка

Практично під час конструювання валків важливо знати положення внутрішньої поверхні радіусу середовища у зонах, що відповідають положенню зтягування (всмоктування) та нагнітання. З огляду на те, що у цих зонах маємо змінність тиску, то у першому наближенні результати розрахунку валків за запропонованою методикою можуть бути використані для контура зовнішніх кромek валка. Також отримані рівняння можуть бути використані для визначення площі поверхні тепло- та масообміну у процесах течії, перемішування.

У цілому запропонований метод розрахунку валків відрізняється простотою розрахунку порівняно з іншими відомими методами і тому може бути використаний як при теоретичних, так і експериментальних дослідженнях.

4.5. Структурно-технологічні властивості тіста в процесі деформації

Зміна реологічних властивостей тіста і його структуризація при деформації сприяє визначенню процесів, що обґрунтовують ці властивості на різних стадіях валкового нагнітання. Дослідження процесу деформації – єдина операція у встановленні структурно-механічних властивостей тіста, що дозволяє їх оперативно регулювати. Структурні властивості тіста при незмінних інших параметрах технологічного нагнітання відображають динаміку процесу. Тому необхідно правильно обґрунтувати зміну реологічних властивостей та визначити, які параметри найбільш суттєво змінюються в процесі нагнітання і значно залежать від допустимих напружень зсуву, в'язкості. Їх значення належать до розрахункових формул для визначення всіх деформацій у вузлі нагнітання.

Переміщення маси тіста по поверхні валка супроводжується зміною допускового напруження зсуву. Для визначення їх величини використано залежність [2, 17]:

$$\tau = k \frac{P^2}{h}, \quad (4.22)$$

де k – константа, що залежить від кута затягування маси тіста поверхнею валка. При будь-яких силах дії тіста, утворювався кут $\alpha = 60^\circ$ і $k = 0.214$; h – товщина відхилення поверхні шару тіста на валку, тобто товщина шару тіста в залежності від утвореного зазору між обертовими валками, м.

Дана залежність дозволила обґрунтувати кінетику циклічно-неперервного нагнітання тіста. Якісна характеристика залежності картини самого процесу від залежностей тиску і тенденції його зміни є критерієм оцінки рівня структуроутворення в робочій камері вузла нагнітання.

Оскільки зміна допускового напруження тіста практично визначається в процесі бродіння, то в наших дослідженнях – у процесі нагнітання. За допомогою залежності (4.22) на рис. 4.8 подано експериментальне значення зміни допускового напруження зсуву в процесі нагнітання тіста.

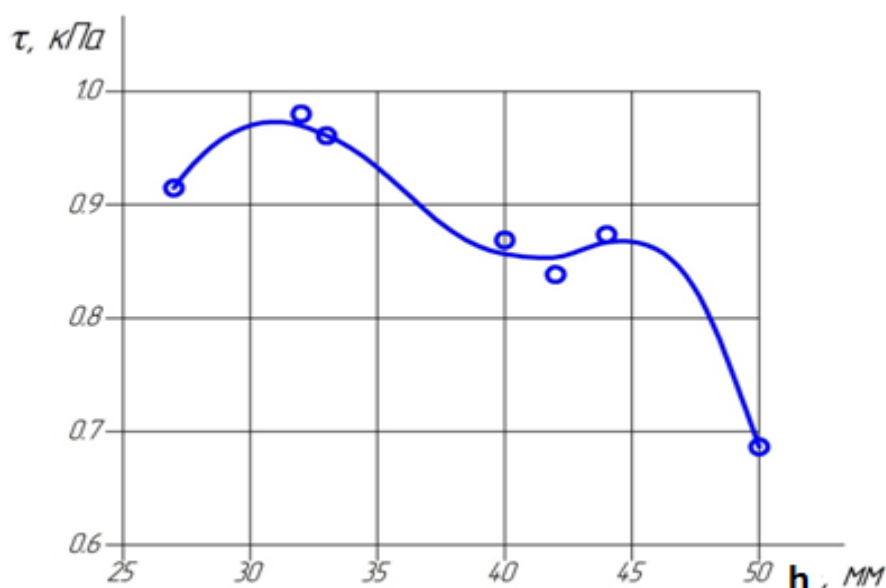


Рис. 4.8. Зміна допускового напруження зсуву від величини поверхні шару тіста на валку в процесі нагнітання

З рис. 4.7 видно, що на початковій стадії нагнітання тіста напруження зсуву має великі значення. Їх розміри тривалість залежать від швидкості руху маси тіста по поверхні валка. Величина стиснутого шару тіста постійно змінюється, значно впливаючи на величину напруження зсуву. Незначна різниця на початковій стадії затягування триває 0,4–1 сек, після чого вирівнюється. Тому в процесі нагнітання тіста значення допускового напруження зсуву рівномірно знижується. Значення τ нагнітання тіста при тривалості самого процесу до 3 сек зменшується приблизно до 300 Па. Найбільше знижується допускове напруження зсуву при затягуванні тіста валками, що відповідає першій стадії нагнітання. Перші деформації тіста виникають при затягуванні і зростають на стадії його стискання. Товщина шару тіста від 50 мм поступово змінюється до величини 35...45, а це відповідно впливає на величину допустимого напруження. Тому протягом 3 сек нагнітання тіста відбувається більш плавно. Цей факт можна пояснити певним розподілом вологи в результаті набухання колоїдів, що до кінця процесу нагнітання постійно зменшують кількість вільної вологи.

На основі отриманих результатів деформації зсуву, необхідно знати зміну ефективної в'язкості тіста. Ефективну в'язкість структурованого тіста визначали за допусковим напруженням зсуву τ і швидкості зсуву. Принцип роботи машини та її конструктивні особливості нагадують віскозиметр, тому швидкість зсуву визначається так [17]:

$$D = \frac{2\omega}{1 - \frac{R_1^2}{R_2^2}}, \quad (4.23)$$

де ω – кутова швидкість обертання валка;

R_1 – радіус валка – початок шару тіста;

R_2 – радіус кінця шару тіста.

Особливо різка зміна η_{ef} спостерігається в діапазоні порівняно малих допускових напружень зсуву. Цей факт підтверджує тезу про формування тіста з шматків у суцільний шар. Тому, на початковому періоді затягування тіста валками, відбуваються великі деформації зсуву, що підтверджує початок утворення його течії в'язкого шару. Зміна показників в'язкості відбувається при $\tau = 9.8 \cdot 10^5$ Па, $P = 4.6 \cdot 10^3$ Па і $h = 3.2$ см, а при збільшенні цих показників в'язкість знижується до свого оптимального значення $\eta = 1.3 \cdot 10^5$ Па·с при постійній швидкості зсуву. Таким чином, збільшення стискуваності шару тіста до $P = 8 \cdot 10^3$ Па сприяє швидкому розкачуванню в'язкого шару.

Структуроутворена дисперсна система, що складається з борошна, рідких компонентів і газоподібної фази, під дією валків постійно змінює свої структурні показники. На перших хвилинах шар частково вибродженого тіста має показники τ , η_{ef} , P , які подалися на процес нагнітання. Подальша зміна показників його стану при деформації сприяє дії ферментним процесам. Їх наявність руйнує клейковинні білки, зменшує механічну міцність останніх, а, отже, знижує міцність всього клейковинного каркасу [5, 12]. З аналізу [9] бачимо, що це загалом змінює в'язкість, пластичність і липкість тіста, визначає можливу кількість і розміри мікропор і капілярів, впливає на його здатність утримувати атмосферне повітря. Розвиток ферментних процесів при нагнітанні валками однозначно пов'язаний з впливом різного характеру деформацій, що визначає вплив на зміну якісних показників бубликів. При великих швидкостях процесу нагнітання, коли оптимальний період малий, вплив ферментних процесів практично дорівнює нулеві. Тому в цьому випадку тісто було крутим і щільним, що підтверджує великі значення ефективної в'язкості.

Пружна деформація накопичується в тісті і неможливо досягнути повного руйнування структури, вона частково зберігає внутрішні звязки. В'язкість зменшується при збільшенні швидкості деформації, що обумовлено значною хаотичністю розміщення частинок в нерухомому бубликовому тісті. Частинки приймають свою орієнтацію в напрямку течії під дією швидкості. Із

збільшенням швидкості деформації напруження зсуву більше має значення при ω 2.0 м/с, а в'язкість має більше зменшення при ω 2.4 м/с ніж при ω 2.0 м/с. Тобто, із збільшенням швидкості деформації, вплив його на градієнт зміни в'язкості тіста слабне, так як слабнуть сили міжмолекулярного зв'язку тіста і зменшення сил опру.

4.5.1. Аналізі динаміки утворення структури тіста бублика

Із зменшенням різного характеру деформацій, ферментне розрідження тіста збільшується, створює сприятливіші умови для розвитку і утворення капілярно-пористої структури, а, отже, призводить до поліпшення якісних показників бублика. Таким чином, завдяки стійкості зв'язку допустимого напруження зсуву, ефективної в'язкості, пов'язаної з вологістю дозволяє сприяти якісній роботі машини, виходу готової продукції і визначає характер затрати енергії для даного процесу [12].

З аналізу досліджень процесу структуроутворення тіста новими валками встановлена залежність між вологістю тіста і його в'язкістю, що можна контролювати автоматично. В роботах Н. Ф. Прокопенко, присвячених контролю за цими параметрами, відзначається, що це дозволяє надалі автоматизувати процес. На відміну від наявних методів контролю процесу нагнітання з утворенням нової структури тіста, запропоновано метод, оснований на аналізі динаміки процесу. Суть його полягає в регулюванні деяких особливостей деформації тіста, що відповідають оптимальним реологічним властивостям, а їх виявлення має сигналізувати про його готовність. Метод контролю базується на залежності розміщення пазів на поверхні валка, їх форми та діаметру.

Отже, при нагнітанні тісто отримує певні механічні впливи, що полягають в механічному переміщенні і його багатократному стискуванню до певного тиску. Величина тиску суттєво впливає на точність проходження процесу і якісні показники бублика, що виявляються на стадіях технологічного процесу – формуванні, вистоюванні і випіканні. Процеси, що відбуваються під стискуванням, досі вивчені мало. Поряд з цим вони суттєво впливають на форму і газоутримну властивість тіста при вистоюванні і випіканні й відповідно, на якість виробів. Властивість такого тіста здебільшого визначається властивістю механічної обробки при нагнітанні. У вузлі нагнітання формувальної машини інтенсивність регулюється параметрами, що визначають рівень стиснення тістової маси в процесах затягування, стискання, розкачування і нагнітання. Крім

цього, впливає кратність і характер рівня стискання. Кратність характеризується дискретністю процесу, а характер – конструктивними параметрами валків. Рівень стискання валками тіста визначали за допомогою формули, запропонованої В. В. Бондаренко, Л. І. Каретніковим:

$$\varepsilon_h = \ln \frac{\delta_{zn}}{\delta_{m0}} + \ln \left(\frac{\delta_{z1} \delta_{z2} \dots \delta_{zn-1}}{\delta_{m1} \delta_{m2} \dots \delta_{mn-1}} \right), \quad (4.24)$$

де $\delta_{z1}, \delta_{z2}, \dots, \delta_{zn-1}$ – величина зазорів між обертовими валками відповідно до кратності проходження процесу нагнітання тіста, мм;

δ_{m0} – початкова товщина тістової маси перед стисканням, мм;

$\delta_{m1}, \delta_{m2}, \dots, \delta_{mn-1}$ – товщина тістової маси на виході із профільного каналу утвореного валками, мм.

Для трьох значень зазору ($\delta_1 = 20$ мм, $\delta_2 = 25$ мм, $\delta_3 = 30$ мм) значення рівня стискання, відповідно, становитиме: $\varepsilon_{h1} = -3.329$, $\varepsilon_{h2} = -2.858$, $\varepsilon_{h3} = -2.198$.

Характер зміни рівня стиснення тістової маси під час обробки при різних значеннях зазору відрізняються один від одного, помітно від параметра, за різних значень тривалості і кратності в границях $\tau = 3-5$ с, $n_{кр} = 5-7$ раз, що пояснюється швидкою зміною структури тіста. За таких умов виникає зміна величини перепаду тиску, і як наслідок, прискорення розчинності бульбашок повітря та збільшення пружних властивостей тіста. Із зростанням пружних властивостей тіста постійно змінюється його об'єм.

Необхідно відмітити виділення вологи на поверхні тонко розкاتаного тіста після профільного каналу. Очевидно, цим можна пояснити відрив шару тіста від поверхні валків його глянцевою поверхню (див. розділ 5).

При стисканні тіста в замкненому об'ємі вузла нагнітання виявляються властивості пружності тіста, що рухається профільним каналом під дією валків. Під дією валків тісто стискається через зменшення профільного каналу і відповідно дії зсувних деформацій впливає на його ущільнення. З моменту, коли починає рухатися поверхня валків, встановлюються інший об'єм тіста та його густина.

У літературі є тільки деякі дані про залежність зміни об'єму тіста від тиску. Крім того, ці дані суттєво відрізняються, оскільки зараз практикують більш інтенсивний заміс, а також додають ферментні препарати, поверхнево-активні речовини, молочну сироватку.

У зв'язку з цим, є актуальним питання про вивчення функціональної залежності $p = f(V)$ для бубликового тіста і впливу механічної дії валків на їх якість з метою обґрунтування раціональних параметрів.

Користуючись рівнянням Ю. А.Мачихіна, визначимо нарощування об'єму:

$$\left(\frac{\Delta V}{V_o} \right) = -p / k' , \quad (4.25)$$

де ΔV – збільшення об'єму (нарощування), м³;

V_o – початковий об'єм, м³;

p – тиск;

k' – уявний об'ємний модуль стиснення.

У даному виразі k' ми замінюємо ε_h , оскільки величина відображає рівень стиснення тіста в процесі нагнітання.

За показниками початкового об'єму, маси і тиску побудовано залежності стану тіста при різних тисках (рис. 4.9).

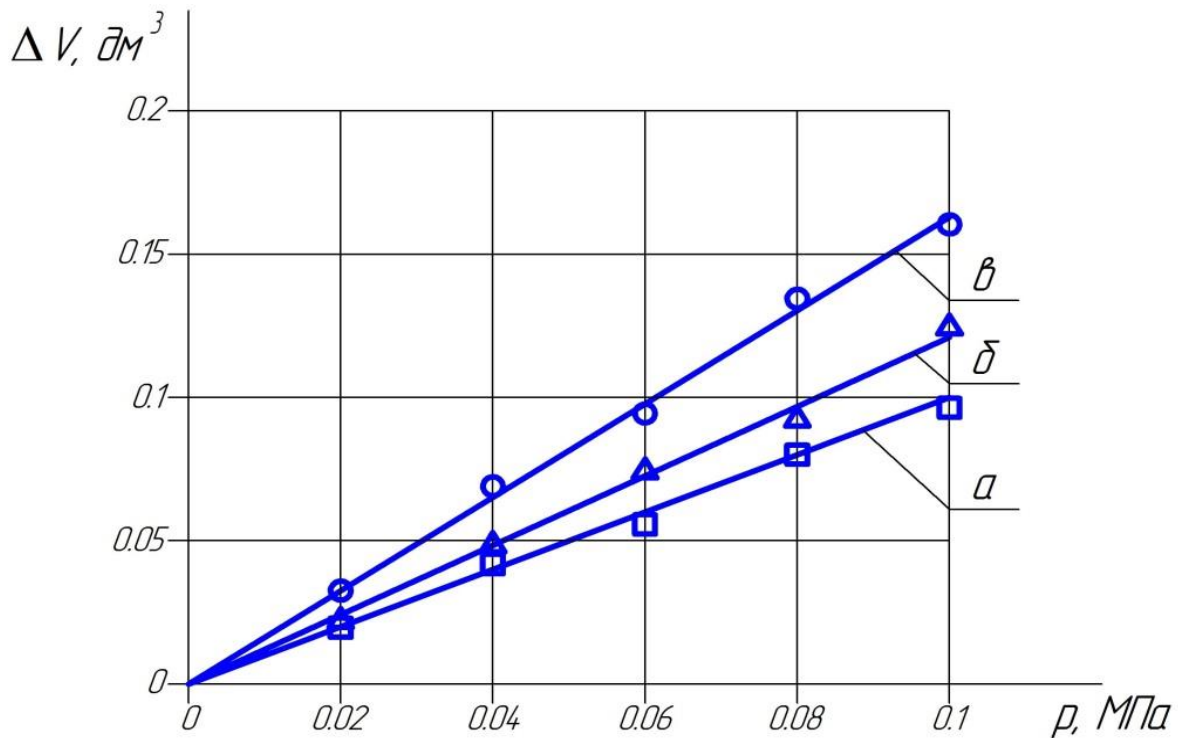


Рис. 4.9. Залежність зміни об'єму від тиску при різних значеннях величини зазору: а) $\delta = 20$ мм; б) $\delta = 25$ мм; в) $\delta = 30$ мм

Порівняльний аналіз зміни об'єму стверджує, що можна суттєво впливати на процес нагнітання і так скоротити його тривалість. З рис. 4.8 бачимо, що лінійна залежність (в) зміни об'єму при зазорі $\delta = 30$ мм розміщена значно вище (а), що відображає значення при зазорі $\delta = 20$ мм. Це свідчить про те, що відбувається менше стиснення тістової маси, а дотримання кратності приводить до більшої зміни об'єму з одночасним зменшенням крутного моменту. Тому необхідно в нових конструкціях вузла нагнітання передбачити зменшення деформації, що вплине на зміну структурних властивостей тіста. Дотримання рівня стискання тістової маси при нагнітанні поліпшує якість готових виробів, тобто питомий об'єм максимально збільшився на 22%, пористість – на 4%.

Такими показниками є дані про зміну бульбашки газу в тістовій заготовці. Це можна пояснити стисненням газових бульбашок і деформаціями структурної сітки, викликані зменшенням віддалі між молекулами біополімерів у складі тіста. На початковій стадії нагнітання немає великого стискання, тому газова фаза є великою, але цей процес дуже короткий. При тиску $P = 3.5 \cdot 10^3$ Па до $P = 5 \cdot 10^3$ Па тісто має мало газової фази, що свідчить про його велику густину. Незначному збільшенню об'єму і складу газової фази сприяє збільшення тиску. Як видно із досліджень та даних літературних джерел [5, 13, 15], стискання газових бульбашок і деформація структурної сітки відбувається одночасно, але в окремі проміжки часу. Один із процесів може прискорюватися, про що свідчать наші результати.

Максимальне дроблення бульбашок газу в тісті тривало протягом усього процесу, що є одним з основних факторів впливу на тривалість нагнітання. Крім того, велика рівномірність газової фази в тісті сприяє газоутримній здатності. Тому багаторазове плавне стискання шару тіста сприяє значному насиченню його киснем повітря з відповідною інтенсифікацією окислювальних процесів. Цим, а також збільшенням кількості пор на одиницю площі, можна пояснити посвітління м'якуша бублика, при формуванні напівфабрикату.

Аналізуючи результати процесу нагнітання валками тіста можна стверджувати, що стискання із дальшим одновісьовим його розтягуванням неоднозначно впливає на його структуру. На початковому етапі процесу і пізніше, важливу роль відіграє його плавність. Це скорочує технологічний цикл, знижує витрати борошна і збільшує вихід готової продукції при збереженні їх високої якості.

Аналіз динаміки зміни модуля об'ємного стискування показав, що в зоні пружних деформацій він постійно змінюється. Із збільшенням тиску, з відомих джерел [7, 8, 9], він зменшується і досягає величини, що є присутня у воді.

Тому зміна властивостей стану рідких компонентів змінюється швидко, що не впливає на зміну температури, яка при нагнітанні повими валками у всіх проведених дослідженнях залишалася без змін.

З наших досліджень та літературних джерел [8, 11, 14] відомо, що при даних операціях змінюються властивості клейковинного скелету з утворенням поперечних зв'язків між суміжними білковими молекулами, що на даній стадії сприяє пружності структури, збільшенню газотримної здатності та зниженню адгезійних властивостей тіста. Загальна дія на тісто тиску і механічного перемішування має суворо визначений оптимум, після якого погіршуються властивості тіста. Тому параметри робочої поверхні валкамають лімітуватися показниками якості напівфабрикату.

Висновки до четвертого розділу

У розділі наведено поєднання подальших теоретичних та феноменологічних міркувань та експериментальних досліджень. У зв'язку з цим впливає:

1. Наявність результатів експериментальних досліджень в сукупності з теоретичними узагальненнями розширюють повноту оцінки фізичних процесів і дозволяють прогнозувати практичну реалізацію одержаних положень та створювати можливості щодо математичних формалізацій елементів досліджуваних технологій.

2. Об'єднувальною ознакою теоретичних та експериментальних досліджень обрано присутність в середовищах систем газової фази, які самоплинно або примусово утворюються у формі диспергованих фаз.

3. Розвиток ферментних процесів при нагнітанні валками однозначно пов'язаний з впливом різного характеру деформацій, що визначає вплив на зміну якісних показників бубликів.

4. Визначено характерні ознаки валкового вузла у формувальних машинах, що мають дискретний характер, розглянуто та проаналізовано можливі структури потоків тіста.

Список використаної літератури

1. Кафаров В. В., Дорохов И. Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии. М.: Наука, 1976. 300 с.
2. Зайцев А. В., Пеленко Ф. В. Моделирование течения вязкой жидкости в трубе. Электронный научный журнал «Процессы и аппараты пищевых производств». Санкт-Петербург: СПбГУНиПТ, 2012. № 1. 2012.
3. Шевченко О., Ткачук Н., Стадник І., Деркач А. Реологічний підхід до

- валкового нагнітання середовища. Наукові праці НУХТ. К.: НУХТ, 2017. Т. 23. № 1. С. 118–125.
4. Pawel Drozdziel, Andrij Derkach, Igor Stadnyk, Tatiana Vitenko Simulation of components mixing in order to determine rational parameters of working bodies. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2016.Vol. 9. P. 130–138.
 5. Стадник І. Я., Лісовенко О. Т. Процеси та машини для замішування тіста. Тернопіль: видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. С. 21–27.
 6. Дробот В. І. Довідник з технології хлібопекарського виробництва. К.: Руслана, 1998. 415 с.
 7. Стадник І., Деркач А., Добротвор І. Моделювання корисної потужності валкової розкатки тіста в термінах реологічних параметрів. *Хранение и переработка зерна*. 2015. № 2. С. 55–58.
 9. Соколенко А. І., Піддубний В. А., Шевченко О. Ю. та ін. Моделювання гідродинаміки газорідних середовищ в умовах бродіння. *Магарач. Виноградарство и виноделие*. 2007. № 1. С. 119–121.
 10. Сандул О. О., Штефан Є. В., Теличкун Ю. С., Теличкун В. І. Математичне моделювання процесу формування тіста екструзією. *Харчова промисловість*. 2001. Вип. 46. С. 95–98.
 11. Андреев А. Н. Расчет энергосиловых параметров процесса раскатки теста на валковой машине. *Вопросы торгово-технологического оборудования: Внутривуз. Сб. науч. тр. Л.: ЛИСТ, 1975, вып. 50. С. 4–7.*
 12. Нркебаев М. Ж. Силовое взаимодействие между обрабатываемыми материалами и валками в области деформации. *Легкая и пищевая промышленность, Алматы, 1995. № 3.*
 13. Стадник І., Деркач А., Добротвор І. Василів В. Методика і результати дослідження утворення пор в бублику «Подільському». *Научные труды SWorld*. 2015. № 2 (39). Том 3. С. 9–16.
 14. Пеленко В. В., Арет В. А., Васильев Д. А., Морозов Е. А., Пеленко Ф. В. Течение продуктов обработки растительного сырья в перерабатывающих аппаратах. *Пищевая технология. М.: Известия ВУЗов, 2008. Вып. 5–6. С. 77–80.*
 15. Стадник І., Деркач А., Добротвор І. Визначення руху середовища при дії кута захвату валків. *Хранение и переработка зерна*. 2015. № 6–7 (194). С. 71–72.
 16. Соколенко А. І., Шевченко О. Ю., Піддубний В. А. Інтенсифікація масообмінних процесів в харчових технологіях. К.: Люксар, 2008. 443 с.

17. Гортинский В. В., Гуськов К. П., Панфилов В. А., Мачихин В. А. Исследование процесса нагнетания бараночного теста валками. Хлебопекарная и кондитерская промышленность. 1967. № 8.
18. Урьев Н. Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. М.: Химия, 1988. 256 с.
19. Мачихин Ю. А., Мачихин С. А. Инженерная реология пищевых материалов. М: Легкая и пищевая пром.-сть, 1991. 216 с.
20. Дзюб А., Мануилов В., Сухенко Ю. Методика исследования процессов коррозионно-механического изнашивания оборудования пищевых и перерабатывающих производств. Polish Academy of Sciences/-Lublin-Rzeszow; AgroMedia 2014. Vol. 16. № 3. 74–81 с.
21. Стадник І., Деркач А., Василів В. Методика розрахунку енергетичних параметрів валкової тісторозкаточної машини. Научные труды SWorld. 2016. № 2 (2). Том 3. С. 69–73.

РОЗДІЛ 5

МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕКСТРУДОВАНОГО КУКУРУДЗЯНОГО БОРОШНА В ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА БУБЛИКІВ ОЗДОРОВЧОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Велике число українців вважають споживати продукти харчування найбільш натуральним і корисним для їх здоров'я і проявляють свій вибір до якості. Кондитерські вироби, особливо борошняні, представляють собою велику групу продукції широкого асортименту, що володіють смаком і багатим ароматом, мають різноманітну форму, склад, консистенцію, структуру. Вони користуються широким попитом серед населення, особливо дітей, завдяки своїй харчовій цінності і калорійності при невисокій ціні. Особливу популярність має бублик подільський, як продукт функціонально-профілактичного призначення.

Числені роботи наших і зарубіжних дослідників спрямовані на доцільність підвищення біологічної цінності кондитерських виробів із борошна, а також необхідність введення в його склад речовин, що додають лікувальні та дієтичні властивості. При цьому намічаються два основних перспективних напрямки підвищення біологічної цінності: збагачення його продуктами, які є джерелами повноцінних білків; збагачення синтетичними і мінеральними речовинами. Введення в ці вироби натуральних продуктів, що містять значну кількість білків, незамінних амінокислот, вітамінів і мінеральних речовин (знежирене молоко, соєве і горохове борошно та ін.), має перевагу перед збагаченням його хімічними препаратами та сумішами, так як натуральні харчові продукти краще засвоюються організмом

Загальна характеристика вхідних сировинних потоків, оцінка їх енергетичних потенціалів в харчових технологіях. Сучасний стан харчових виробництв характеризується необхідністю проведення модернізації та оптимізації всіх галузей виробничого сектору України на основі використання новітніх технологій і обладнання. Важливим завданням є максимально раціональне використання матеріальних і енергетичних ресурсів сировини, палива, води. Для досягнення цього результату необхідне чітке уявлення про перетворення, що відбуваються з сировиною в умовах технологічних операцій, витрати та втрати ресурсів для їх здійснення.

Отримання кінцевого продукту з вхідної сировини відбувається завдяки різним процесам, з операціями по формуванню відповідних показників.

Сировина, що використовується в бродильних технологіях, повинна щорічно відновлюватися в кількості, достатній для про-мислової переробки, мати високий вміст крохмалю або цукрів. Цим вимогам відповідають картопля, зернові культури, цукровий буряк, виноград, фрукти та ягоди [4].

Наведемо узагальнені характеристики деяких культур, які є основою бродильних виробництв.

Картопля. З усіх видів рослинної харчової сировини картопля в найбільшій мірі відповідає технологічним вимогам спиртового виробництва. З картоплі, у порівнянні з зерном, з одиниці посівної площі отримують в 3...4 рази більше крохмалю. Картопляний крохмаль швидше розварюється, утворюється рухливе сусло, в ньому знаходяться азотисті та фосфорні речовини в кількості, достатній для харчування дріжджів, з нього отримують найбільший вихід спирту. При переробці картоплі виробнича потужність заводу на 10% більша, а витрати палива на 12% менші, ніж при переробці зерна [5].

До недоліків картоплі, як сировини для виробництва спирту, відносять значні витрати праці на її вирощування, втрати при зберіганні у зв'язку з високою вологістю та обмежена стійкість до захворювань, суттєві витрати при транспортуванні на великі відстані. Це призвело до того, що дана культура при всіх її перевагах не отримала достатнього поширення, як сировина спиртового виробництва.

Зернові культури. На спирт переробляють будь-яке зерно, в тому числі й зерно, що не використовується в харчових та кормових цілях. Щорічний об'єм переробки складає (у %): пшениці – 50 (переважно дефектної), ячменю – 20, жита – 12, кукурудзи – 8 та інших культур. Для приготування солоду використовують кондиційне високоякісне зерно.

Кукурудза. Із зернових культур кращою сировиною для виробництва спирту є кукурудза. В ній міститься, порівняно з іншими зерновими культурами, більше крохмалю та жиру, менше клітковини, що підвищує харчову цінність барди. Врожай кукурудзи, з одиниці посівної площі, в 2...3 рази вищий родючості інших зернових культур [6].

Пшениця, ячмінь, овес, жито. Жито, пшениця, ячмінь та овес вирощуються в нашій країні та можуть використовуватися як сировина для виробництва спирту. Виробництво спирту саме з цих зернових культур, через необхідність розварювання сировини та оцукрювання крохмалю, веде до більших енергетичних витрат на технологічні потреби. Це, в свою чергу, збільшує собівартість виробництва спирту. Окрім того, наявність таких операцій ускладнює технологічну схему виробництва спирту.

Меляса. Мелясою називають останній маточний розчин – відтік, що утворюється при відокремленні кристалів сахарози на центрифугах. Відповідно до виду вхідної сировини для виробництва цукру розрізняють бурячну та тростинну мелясу. Меляса є густою в'язкою рідиною темно-коричневого кольору зі специфічним запахом карамелі та меланоїдинів; бурячна меляса має також запах триметиламіну та інших летких амінів, що утворюються при розпаді бетаїну. В мелясі містяться цукри, які отримані з соку цукрового буряка або цукрової тростини, що не були видалені при хімічному очищенні, а також в розчині присутня сахароза, яку виділяти класичним методом кристалізації вже економічно невигідно. При одержанні цукру з буряку вихід меляси, у перерахунку на безводну, коливається від 3,5 до 5% від маси цукрового буряку чи тростини. З мелясою відходить від 10 до 15% усього цукру, що міститься у вхідній сировині.

У даному розділі розглянуто теоретичні основи застосування екструдованого кукурудзяного борошна в технології для виробництва дрібно штучної продукції, визначено перспективи використання нетрадиційних видів борошна та борошняних сумішей.

5.1. Основні правила виробництва кондитерських виробів в промисловості

Кондитерське виробництво - це мистецтво, а значить існує своя мода, яка швидкоплинна. Якість виробів суттєво залежить від того, на скільки виробник сприйнятливий до останніх тенденцій на ринку продукції, до моди на неї, знає смаки споживачів і їхню платоспроможність.

Виробництво тортів і тістечок починає зростати там, де відійшли від виробництва бісквітних тортів кілограмової маси з масляним кремом. На заміну їм приходять нові сорти, в т.ч. на основі білково-збивних, білково-горіхових, пісочних напівфабрикатів, які оздоблюються новими кремами більшого терміну зберігання, з білковими, фруктовими, горіховими наповнювачами, бобовими пастами та марципанами.

Торт частіше стає продуктом святкового призначення, отже, різко підвищується вимоги до його оздоблення і пакування. Однак красиве оздоблення не може замінити смакових якостей, то ж особливої уваги приділяють якості, що має відповідати таким вимогам:

- концепції збалансованого харчування;
- санітарній гігієні;

- безпосередньо вимогам споживача.

Основний компонент борошняних кондитерських виробів, від якого суттєво залежить властивості тіста і кінцевого продукту – пшеничне борошно. У виробництві більшості цих виробів повинно використовуватися борошно з середньою і слабкою добре розтяжною клейковиною в кількості не менше 28,0% з показником якості по ІДК 80–90 одиниць прибору.

При використанні борошна з сильною, пружною і особливо короткорваною клейковиною рекомендується використовувати такі поліпшувачі, як ферментні препарати «Нейтрала», «Грандаміл» та ін., які послаблюють клейковину, поліпшують об'єм, форму, поверхню, колір виробів.

Крупнота помелу борошна також грає суттєво значення, тому що від величини часток залежить швидкість утворення тіста. Чим крупніше частки, тим повільніше проходить їх набухання і утворення клейковини, тісто залишається пластичним, не «затягується».

Зі зменшенням розмірів часток і збільшенням їх питомої поверхні різко збільшується водопоглинальна здатність борошна, тісто стає в'язким, пружним.

Для пісочного, бісквітного, вафельного, пряничного тіста бажано мати пластичне тісто з обмеженим набуханням білків. Борошно при цьому повинно бути більш крупного помелу і за розміром часток повинно співвідноситися з такими показниками: залишок на шовковому ситі № 27 не більше 5%, прохід через сито № 43 – не більше 15%.

На фізичні властивості кондитерського тіста (розтяжність, пружність, в'язкість) суттєво впливає крохмаль. Чим більше в борошні крохмалю, тим нижче вміст білкових речовин, тому для зниження пружності тіста в деяких виробках частину борошна замінюють крохмалем.

У борошняних кондитерських виробках вміщується значна кількість цукру і жиру, що впливають на структуру тіста і якість готових виробів. Це вкрай важливо враховувати при розробленні нових сортів. Цукор, впливаючи на смак і колір виробу, крім того, має здатність обмежувати набухання, завдяки чому стає можливим регулювати ступінь набухання білків і крохмалю борошна. Власне, цукор є пластифікатором тіста. Допущені в рецептурах відхилення в дозуванні цукру дозволяють враховувати властивості борошна і температуру.

Жири при додаванні в тісто знижують здатність набухання колоїдів борошна. В процесі замішування частки, жиру у виді тоненьких плівок розподіляються між частками борошна, нібито обкутуючи і змазуючи їх, тим самим перешкоджаючи проникненню вологи та утворенню клейковини. Це сприяє зменшенню пружності і підвищенню пластичності тіста.

При випіканні заготовок прошарки жиру між частками борошна сприяють утворенню пористої структури і крихкості готових виробів. Чим тонше плівки жиру і чим більше їх в тісті, тим більш пористу і крихку структуру будуть мати вироби. Дисперсність жиру дуже впливає на якість виробів. В диспергованій, добре збитій емульсії, яка додається до тіста, жир розподілений у вигляді дуже дрібних крапельок, що сприяє утворенню доброї структури виробів. Якщо жир збирається в тісті у виді крупних крапельок або кульок, він не обкутує частки борошна, погано утримується виробами і виділяється з них в процесі зберігання. Такий перебіг процесу характерний, наприклад, для рослинної олії. Твердий високоплавкий жир має велику в'язкість і пластичність топлення, він теж погано розподіляється між частками борошна. Добре розподіляється в тісті тільки жир, що зберігає пластичність у відносно широкому інтервалі температур. Наприклад, вершкове масло.

Нині в Україні організовано виробництво спеціалізованих жирів (Кіровоградський завод модифікованих жирів). Їх виробництво включає в себе стадії фракціонування, персетефікації, гідрогенізації. В якості сировини використовуються різні рослинні олії, в тому числі пальмова. Ці жири призначені для начинок і тіста, пластичних кондитерських мас.

Спеціалізовані маргарини відрізняються різноманіттям і широкою сферою застосування. Для виробництва тортів, тістечок, печива, вафель використовують жири з різною консистенцією у відповідності з їх конкретним призначенням. Вони відрізняються за складом і призначенні для певного виду виробництва.

Асортимент спеціалізованих жирів доповнюється шертингами – продуктами, що мають вологість не більше 1,0% і використовуються в основному для приготування тіста. Замінники молочного жиру призначені для заміни вершкового масла при виробництві кормових мас і кондитерських виробів. Вони дешевші за масло, добре з ним поєднуються, вміщують у своєму складі білки, до того ж довгі терміни зберігання їх високі. Важливою є їх лабільна якість та зручність при транспортуванні і зберіганні: вони не потребують охолодження.

У виробництві борошняних кондитерських виробів дуже важливо, щоб усі компоненти, особливо жири, були рівномірно розподілені по всій масі тіста. При виготовленні цукрових сортів печива і пряників використовуються взаємно нерозчинні продукти (молоко, вода, жир). Дозування суміші з таких видів сировини одним дозатором можливо тільки в тому разі, якщо отримана нерозшарована емульсія.

Для отримання міцної нерозшарованої емульсії з двох взаємонерозчинних рідин необхідна присутність в цій системі третьої речовини-емульгатора, який знижує поверхневий натяг на межі розподілу двох фаз і обкутує тонкою механічною міцною плівкою частки дисперсної фази, попереджуючи їх злипання.

Міцність емульсії залежить як від виду і концентрації емульсії, так і від ступеня дисперсності жиру: чим вона вище, тим при інших рівних умовах стійкіше емульсія. Використання емульсії сприяє рівномірному розподіленню диспергованого жиру в тісті, створює сприятливі умови для отримання найбільш пластичного тіста, яке легко формується. Печиво, яке приготовлене на емульсії, має більш чіткий відбиток штампу, здатне до більшої намокливості, більш пористе і крихке. Рекомендується використовувати 0,9% ПАР до маси сировини. При цьому можливо скоротити на 20% розхід меланжу і на 5% цукру не погіршуючи якість виробів. Прискорений спосіб виробництва заварних пряників який використовують в промисловості, має ряд суттєвих недоліків:

- при порційному замісі тіста використовується багаторазове дозування сировини, що може привести до порушення рецептури;
- недостатньо висока якість пряників з-за нерівномірного розподілення сировини в тісті;
- відсутність фази приготування заварки приводить до скорого черствіння пряників;
- значна кількість ручних операцій і відсутність поточності.

З метою усунення відмічених недоліків розроблена технологія приготування заварних пряників на емульсії.

Для підвищення стійкості емульсії і уповільнення процесу черствіння пряників рекомендується додавати жир 0,5% до маси емульсії. При цьому розхід жиру в тісто може бути скорочений на 1,5%.

Замість тіста здійснюється шляхом заварювання борошна емульсією при одночасному змішуванні компонентів і їх охолодженні. Розчин хімічних розпушувачів додається через 1–2 хв. оптимальний час замісу тіста 3–4 хв., температура 28–30 С, вологість 20,5–21%. Пряники, які приготували на емульсії, мають гладку поверхню, мілку рівномірну пористість, більший об'єм і здатність до набухання, меншу щільність. Крім того, уповільнюється черствіння пряників, скорочується трудомісткість, усувається процес багатократного дозування сировини, тому що емульсія готується 3–4 рази в зміну.

У виробництві тортів і тістечок серед випечених напівфабрикатів значну питому вагу займає бісквіт. Він характеризується легкістю, м'якістю, пишністю, має ніжну еластичну структуру і гладку тонку скоринку, добре поєднується з різними оздоблювальними напівфабрикатами: кремовими, збитими вершками, свіжими і консервованими ягодами і фруктами, горіхами, джемами, глазурами та ін.

Бісквіт може бути кількох видів: з какао, з горіхами, масляний, бісквіт-буше. І хоча основні компоненти, які входять до складу цього тіста, одні й ті ж, але завдяки різному їх співвідношенню і різноманітним способам підготовки продуктів і оформлення можна з нього отримати багато різних виробів.

По своїй структурі бісквітне тісто-висококонцентрована дисперсія повітря в середовищі, яке складається з яйце-продуктів, цукру, борошна, цьому бісквітне тісто можна віднести до пін.

Перемішування збитої маси з борошном повинно бути не більше 15 секунд. Це викликано необхідністю зменшити по можливості набухання клейковини. Більш довгий заміс може привести до отримання щільного зтягнутого тіста, а бісквіт буде мало пористим і щільним.

Бісквітне тісто характеризується великою нестійкістю повітряної фази. Цьому готове тісто не може бути заражене інтенсивним механічним впливом.

Для утворення стійкої пінної структури необхідно послабити протидію сил поверхневого на тяжіння системи, що досягається шляхом введення в масу, що збивало, поверхнево-активних речовини (ПАР), які мають здатність значною мірою знижувати поверхневе на тяжіння на межі розподілу фаз.

Найбільш широко в використовується білково-збивний напівфабрикат, особливістю якого є те, що білок, з метою збільшення ціноутворюючої здібності, піддається вистоюванню впродовж 20–24 годин; якість підготовленого білка, як і випеченого напівфабрикату, визначається на багатьох підприємствах органолептичного і залежить від досвіду та інтуїції майстра. Розроблено технологічну схему і визначено параметри виготовлення білково-збивного, марципанового напівфабрикатів, що являє інтерес для багатьох кондитерських цехів.

Останній час деякі хлібозаводи використовують сухий білок виробництва Голландії або Бельгії, який має високу піноутворювальну здатність. Такий білок можна використовувати без бродіння, попередньо відновити його шляхом змішування з 3–5-кратною кількістю води температурою 35–40°C впродовж 20–30 хвилин.

Однак попередньо необхідно в лабораторних умовах перевірити піноутворювальну здатність сухого білка, тому що кожна партія може мати різні якісні показники. Значним попитом у населення користуються вироби, виготовленні з листового напівфабрикату.

Щоб забезпечити високу якість такого напівфабрикату, необхідно для його виготовлення перед усім підбирати борошно з сильною добре розтягнутою клейковиною і для перешарування використовувати високоякісний маргарин з пластичною структурою (без грудок), вологістю не більше 16%, або спеціальні жири для прошарування [2].

5.2. Аналіз особливостей технологічних взаємозв'язків при формуванні напівфабрикату

Сучасні ринкові умови ставлять перед виробниками продуктів харчування завдання впровадження конкурентоспроможних технологій за умов одночасного покращення споживчих властивостей, підвищення харчової цінності та оновлення асортименту продовольчих товарів, зокрема дрібноштучними виробами.

Асортимент цих виробів на ринку, свідчить про попит українського споживача, та тенденцію до більшого споживання таких виробів імпортного виробництва. Вибір асортиментубубликів вітчизняного виробника на ринку досить обмежений і не завжди відповідає потребам споживчого попиту, та вимогам нутріціології. Діапазон його використання зумовлений в першу чергу технологічними чинниками та органолептичними показниками, оскільки він добре поєднується з іншими випеченими напівфабрикатами (білково-збивним та пісочним), а також з більшістю оздоблювальних напівфабрикатів.

Аналіз структури харчування населення України засвідчує стрімке зростання попиту на дрібноштучні напівфабрикати. А це у свою чергу зумовлює потребу у створенні продукції з високою харчовою цінністю та безпечністю, з високими технологічними властивостями, що дозволить розширити асортимент існуючих напівфабрикатів і готових виробів.

Узагальнення даних сучасних вітчизняних та зарубіжних джерел дозволяє класифікувати шляхи розвитку інноваційних технологій напівфабрикату за кількома напрямками:

- збагачення функціональними інгредієнтами;
- збагачення харчовими добавками та якісний вплив робочих органів на структурно-механічні властивості напівфабрикату;

- забезпечення сталості процесу за рахунок контрольованих деформаційних впливів;
- збільшення терміну зберігання.

Важливими факторами, що впливають на технологічні властивості напівфабрикату є не тільки якість сировини, а також способи та режими проведення процесу виробництва.

Т. В. Матвеевой і Є. Н. Холодовой проведено комплексне дослідження спрямоване на розробку науково-обґрунтованих рецептур і технології виробництва напівфабрикатів з використанням нетрадиційних джерел рослинної сировини – пшоняного та тритікалевого борошна, функціональних інгредієнтів Orafti®P95 і сиропу апельсиново-женьшеневого. Встановлено, що найкращими реологічними, органолептичними, фізико-хімічними характеристиками відрізняються зразки: з заміною 80% пшеничного борошна пшоняним, 70% пшеничного борошна тритікалевим, 80% пшеничного борошна пшоняним і 10% цукру Orafti®P95, 70% пшеничного борошна тритікалевим і 10% цукру Orafti®P95, 80% пшеничного борошна пшоняним і 10% цукру апельсиново-женьшеневим сиропом, 70% пшеничного борошна тритікалевим і 10% цукру апельсиново-женьшеневим сиропом.

Характерною особливістю замішаного нетрадиційного тіста є те, що в його склад крім піноутворюючих речовин входять і інші рецептурні компоненти, що здійснюють значний вплив на їх формування і якість випеченого напівфабрикату.

Показники якості борошна та його клейковини коливаються в широкому діапазоні і потребують постійної корекції технологічних та конструктивних режимів формування напівфабрикатів. Неналагодженість взаємозв'язків технічних і технологічних виробництва спеціалізованих видів напівфабрикатів при їх формуванні ускладнює весь процес.

Потребує уваги той факт, що процес нагнітання такого тіста у формувальній машині є складним через спільний вплив численних фізико-хімічних, фізико-технічних та інших факторів. Закономірності, що обумовлюють утворення структури тіста суттєво змінюються залежно від умов проведення конкретного технологічного експерименту.

Основними характеристиками, що всесторонньо характеризують систему є – здатність, кратність, стійкість та дисперсність тіста до деформаційних впливів, тобто рівномірний розподіл бульбашок за розміром чи поверхнею поділу розчин-газ, в одиниці об'єму сформованого бублика. Така структура тіста визначається співвідношенням об'ємів рідкої та газової

фази і в залежності від цього співвідношення структура комірки має сферичну форму чи форму багатогранника. Одночасно змінюється питома поверхня тіста за рахунок дифузії газу із мілких бульбашок в більші – внаслідок різниці капілярних тисків. І хоча стан тіста з багатогранними комірками близький до рівноважного, тому таке тісто володіє більшою стійкістю ніж із сфероподібними комірками, проте, за рахунок зменшення кількості дрібних бульбашок, загальна кількість бульбашок повітря в даному об'ємі зменшується.

Стійкість дисперсної системи обумовлюється структурно-механічними властивостями адсорбційних шарів і термодинамічною стійкістю рідких прошарків. Ці адсорбційні шари надають тістові високу структурну в'язкість і механічну міцність, створюють каркас, що надає йому певні фізико-хімічні властивості твердого тіла. Термодинамічний фактор стійкості тіста пов'язаний з тиском, який виникає при дії валкових робочих органів, в результаті наближення між собою двох її бульбашок.

Тісто, що знаходиться в робочій камері формувальної машини постійно одержує деформаційні впливи різного характеру та проходить його біохімічне бродіння. Відповідно накопичуються продукти бродіння, які формують смак і аромат бутика, утворюється розпушена еластична м'якушка.

Хлібопекарські дріжджі зброджують всі основні цукри тіста: глюкозу, фруктозу, сахарозу і мальтозу після розкладання двох останніх на моносахариди. Сахароза під дією ферменту сахарози трансформується на глюкозу і фруктозу, а мальтоза під дією ферменту мальтази перетворюється на дві молекули глюкози.

Замішування тіста протягом 0.5...1 годин досягається зброджування власних цукрів борошна, а подальша життєдіяльність дріжджів пов'язана зі станом вуглеводно-амілазного і білково-протеїназного комплексу борошна. Ними забезпечується ферментативний гідроліз крохмалю і в тісті синтезується мальтоза, яка є основною речовиною живлення дріжджів.

Динаміка зброджування цукрів визначає динаміку газоутворення. Очевидно, що на неї впливає рецептура середовища. За показником синтезу CO_2 і за інших рівних умов це добре відображується в графічній інтерпретації (рис. 5.1). Із рис. 5.1 видно, що тісто після 60 хвилин бродіння поступає в робочу камеру для формування напівфабрикату. Відповідно дане тісто піддається постійним деформаціям з боку валків, але при цьому продовжує бродіння.

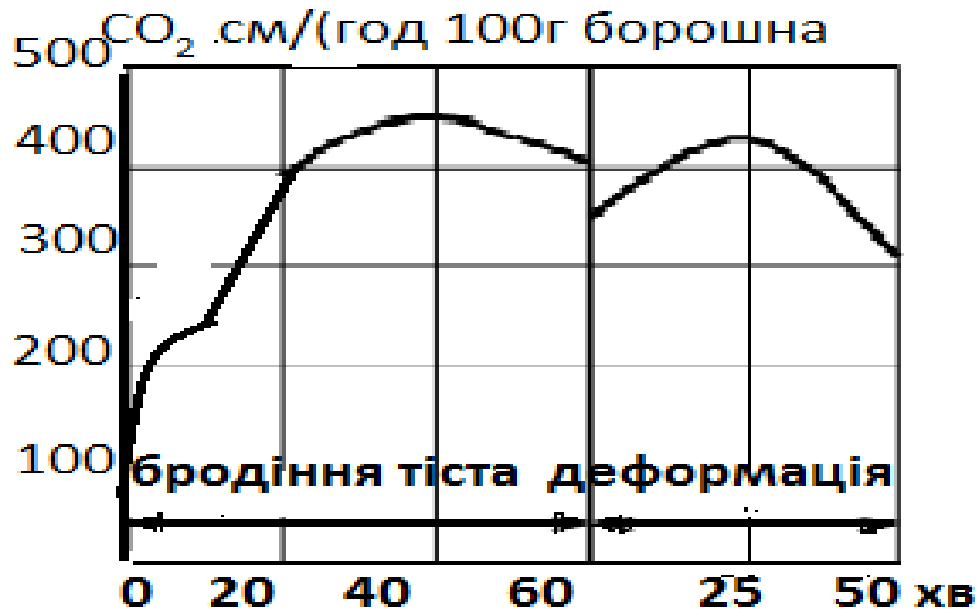


Рис. 5.1. Інтенсивність бродіння тіста для виробництва бубликових напівфабрикатів

Причиною такої складної залежності і присутності екстремумів є постійні зміни концентрацій речовин, їх трансформації тощо, до яких додаються змінні значення тисків. Звідси відчутний вплив рецептури, внесення осмоактивних речовин, поява етанолу, адаптація дріжджів до нових умов. Значна кількість речовин в тісті, зміна концентрацій, взаємодії між ними і мікроорганізмами, присутність стимуляторів, тощо, призводять до відносної нестабільності системи. За таких умов існує розуміння того, в якому напрямку слід оцінювати впливи окремих конструктивних та технологічних факторів на утворення структури напівфабрикату.

За час нагнітання і часткового дозрівання тіста його маса зменшується на 1,5...3,5% за рахунок часткового випаровування, але, в основному, за втрат сухих речовин на бродіння. В оточуюче середовище виділяється певна частина діоксиду вуглецю, спирту та летких кислот. За кількістю CO₂ і C₂H₅OH, що утворилися, можливо визначати загальні втрати сухих речовин. Вважається, що за період дії валків на формування напівфабрикату бубликів на густих опарах, втрати СР близькі до 3,0...3,3, а на рідких – 2,5...2,8%.

Відомо, що дисперсність структури тіста залежить не лише від його концентрації, але і від деформаційних впливів. При збільшенні концентрації і рівномірно розподілених деформацій утворююча сформована маса одержує

вищу дисперсність, структурно-механічні властивості її змінюються в напрямку зменшення текучості і збільшення граничної кінетичної напруги зсуву.

Для утворення стійкої структури необхідно послабити протидію сил поверхневого натягу системи, що досягається шляхом плавних, рівномірних діючих сил валка на масу, що формується. Така методика має здатність значною мірою знижувати поверхневий натяг на межі розподілу фаз та сприяє зниженню вартості та енергоємності, а також раціонального використання сировинних ресурсів. Описані недоліки частково усуваються у способі нагнітання тіста у вузлі формувальної машини при виробництві бубликів. Показники питомого об'єму, пористості і загальної деформації дії валків, дозволяють у сформованому тісті за нашими запропонованими методами і рецептурами, бути вищими, ніж у контрольного зразка сформованого на існуючих машинах. Крім цього бублик одержує рівномірну тонкостінну пористість.

З метою створення бубликових виробів спеціального призначення, зокрема для осіб, що хворіють на целиакію та осіб у яких захворювання на целиакію поєднується з цукровим діабетом, використовується безглютенове борошно (рисове, кукурудзяне та гречане) та лактитол замість цукру.

Важливою залишається проблема збагачення раціону харчування пересічного українця мінеральними речовинами, вітаміном Е, а також ПНЖК. Стосовно державної політики в галузі харчування населення відзначено про важливість надходження мінералів щодня в наш організм з їжею, оскільки їх дефіцит призводить до порушення роботи всіх органів і систем. З метою вирішення цієї проблеми запропоновано спосіб виробництва бубликів «Подільські» шляхом додавання до рецептури ЕКБ, який є джерелом мінеральних речовин, ПНЖК, вітаміну Е. На стадії приготування тіста вноситься 8–15% ЕКБ до маси загальної рецептурної сировини.

Незважаючи на те, що під час виготовлення напівфабрикату пропонується велика кількість добавок, пошук ефективних стабілізаторів тіста, зокрема нетрадиційних видів борошна, без застосування хімічних поліпшувачів структури, залишається актуальним.

5.1.1. Дослідження функціонально-технологічних властивостей модифікованої зернової сировини

Здійснений патентний пошук показує, що сьогодні в Україні та країнах поблизького зарубіжжя застосування екструдатів крохмалевмісної сировини

знайшло широке використання в найрізноманітніших харчових технологіях. Розробки в цьому напрямку продовжують стрімко розвиватися. Методом екструзії переробляють цільне або подрібнене зерно, вторинну сировину зернової, м'ясної, рибної, молочної промисловості. В результаті екструзійної обробки одержується сировина чи готові до споживання продукти із зовсім новими, наперед заданими властивостями.

Аналіз вітчизняних і зарубіжних публікацій по використанню модифікованої зернової сировини в різних галузях харчової промисловості показує, що цим видам допоміжних матеріалів приділяється все більше уваги. Сьогодні, екструзійний метод широко використовують для переробки різних видів харчової сировини в екструдерах, внаслідок чого полімери та біополімери піддаються цілому ряду фізичних, хімічних перетворень. При цьому змінюється форма, структура, хімічний склад та властивості матеріалу.

Екструзійна технологія дозволяє розширити асортимент виробів у хлібопекарському та кондитерському виробництві. Екструдати пшениці, жита, кукурудзи використовуються для поліпшення якості житнього та пшеничного хліба. Найкращі результати показують екструдати кукурудзи.

Дробот В.І., Арсенєвою Л.Ю. у співпраці з науковцями НВО з крохмалепродуктів (Росія) запропоновано спосіб поліпшення якості хлібобулочних виробів шляхом додавання в тісто екструдованого кукурудзяного борошна і крохмалю. Встановлено, що додавання замість борошна 1,5% цих продуктів покращує пружно-еластичні властивості клейковини та збільшує в'язкість тіста, внаслідок чого збільшується об'ємний вихід формового хліба.

Для обґрунтування застосування екструдованого кукурудзяного борошна в технології формування бубликів слід розглянути технологію виготовлення екструдованого кукурудзяного борошна та вплив екструзійного оброблення на фізико-хімічні, біохімічні та мікробіологічні показники сировини.

Екструдоване кукурудзяне борошно виготовляється з цільного зерна.

Н. П. Козьміною встановлено, що співвідношення частин зернівки (у %) різних культур коливається в значних межах. Зернівка пшениці майже на 80,0% складається з ендосперму, до 8,0% займають плодові та насінні оболонки та приблизно 8,0–8,8% займає алейроновий шар, до 3,0% зародок. Анатомічною особливістю будови зернівки кукурудзи є практично відсутність алейронового шару, а зародок може займати до 12%. Ендосперм зернівки кукурудзи займає 81,0...94,0%, що в середньому на 10% більше ніж у зернівці пшениці, тому містить більше крохмалю у порівнянні з пшеницею, а також за рахунок великого зародка містить більше жирорічинних сполук. Особливості будови

зернівки підтверджуються хімічним складом наведеним в табл. 5.1. Вміст жиру в зерні кукурудзи майже на 3% більший ніж в пшениці, вміст вуглеводів та білка практично однаковий.

Таблиця 5.1

Хімічний склад зернівок різних злаків, %

Культура	Білок	Вуглеводи	Клітковина	Жир	Зола
Пшениця	10,0	70,0	1,6	1,7	1,7
Кукурудза	9,0	69,2	2,2	4,4	1,3

Екструдоване кукурудзяне борошно виготовляється методом гарячої екструзії, або екструзійного «варіння», що здійснюється при високих швидкостях зсуву і тиску, значному переході механічної енергії в теплову. Дія напруги зсуву призводить до різних за глибиною змін якісних показників матеріалів. Така обробка здійснюється з регульованою подачею тепла, як безпосередньо в продукт так і через зовнішні стінки екструдера. Екструзійне варіння – новий прогресивний технологічний процес термомеханічної обробки різноманітної харчової сировини. Метод гарячої екструзії відрізняється великою швидкістю процесу. Дослідженнями встановлено, що зміна структури біополімерів відбувається при відносно невисоких їх деформаціях під час переробки.

Проведений аналіз опублікованих робіт [6, 6, 7] свідчить про глибокі зміни властивостей зернової сировини в процесі високотемпературної екструзії, які можна поділити на три основні групи:

- фізичні та колоїдні (зміна розмірних характеристик сировини, теплофізичних, оптичних, сорбційних, текстурних і реологічних властивостей);
- хімічні та біохімічні (деструкція крохмалю з накопиченням низькомолекулярних декстринів, інверсія сахарози, денатурація та деструкція білкових речовин, вітамінів, жирів, інактивація або активація ферментів, покращення перетравлюванню, зміна кольору);
- мікробіологічні (знищення бактеріальних спор, популяцій бактерій і грибів).

При екструзійній обробці харчової сировини утворюється маса, яка набуває пластичних властивостей. Підвищення температури викликає розтяжність і перебудову деяких полімерних структурних утворень, білки при цьому суттєво змінюються, частково денатурують [5, 7].

Під дією тиску і напруги зсуву глобулярна форма білкових молекул змінюється так, що за довжиною вона збільшується в кілька разів більше, ніж за діаметром, а в деяких випадках глобула частково «розкручується» при протисненні через канали матриці. В цьому випадку температура на виході маси з екструдера повинна бути такою, щоб відбулася фіксація енергетично невігідного стану глобули. Ферментативна атакованість білків зростає при цьому в два рази [6, 7].

Отже під дією гідротермічної обробки з білками відбуваються зміни, які називаються одним загальним терміном – денатурація, тобто внутрішньо молекулярне явище, яке характеризується перегрупуванням внутрішніх зв'язків. Відбувається порушення впорядкованості внутрішньої будови молекули, що характеризується зміною фізико-хімічних властивостей білків (розчинності, в'язкості розчинів, стійкості до дії ферментів та ін.). Це явище зумовлене наявністю в молекулах білку великої кількості не міцних зв'язків. В процесі екструзії змінюється якісний склад білків: кількість водорозчинних білків зменшується, тоді як соле- і лугорозчинних – збільшується [8].

Екструзійна обробка білкових матеріалів широко використовується для зміни їх структури. Зокрема, знежирений соєвий білок може бути модифікований в екструдері, з утворенням складної пористої структури схожої на м'ясо. Текстурація включає перебудову білкових молекул у шарову масу з перехресними зв'язками, яка стоїть на перешкоді подальшого руйнування при тепловій обробці. Поряд з гідрофобною взаємодією ланцюгів спостерігається утворення водневих та дисульфідних зв'язків, міжланцюгових амідних зв'язків, які виникають в результаті взаємодії при високих температурах бокових аміно- і карбоксильних груп та амінокислотних залишків [9].

Тільки деяка частина білка втрачається внаслідок глибокої денатурації, яка приводить до розриву пептидних зв'язків, проте фракційний склад білкових речовин зазнає значних змін. В літературі зустрічаються суперечливі точки зору на це питання. Деякі вчені вважають, що при екструзійній обробці збільшується (в порівнянні з вихідною сировиною) вміст фізіологічно рухомих білків – альбумінів та глобулінів, а кількість проламінів і глютелінів – зменшується, але жодних пояснень автори не дають [10].

Відомо, що зерно злакових містить спирторозчинні білки – проламіни. Також відомо, що проламіни в своєму складі містять незначну кількість незамінних амінокислот – лізину, триптофану, треоніну. Головним білком кукурудзи – є проламіни і в менших кількостях альбуміни, глобуліни та глютеніни. При екструзії кукурудзяного борошна відбувається зменшення

водорозчинних білків – альбумінів на 9%, проте незначне збільшення глобулінів, проламінів та глютенінів. Результати дослідження фракційного складу білків екструдованого кукурудзяного борошна та пшеничного вищого гатунку наведено в таблиці 5.2 [66].

Аналіз даних таблиці 5.2 показує, що екструзійне оброблення викликає незначне зниження вмісту загального білка в екструдатах, але суттєво впливає на зміни фракційного складу білкових речовин. Зменшення розчинності пояснюється не ковалентними взаємодіями між поліпептидними ланцюгами та іншими складовими, з утворенням нових амідних та дисульфідних зв'язків за рахунок реакції обміну. Вологотермічне оброблення і механічний вплив викликають часткове структурне розгортання білка. Тепловий рух пептидних ланцюгів викликає розрив водневих зв'язків між ланцюгами, одночасно із структурним розгортанням білків відбувається їх агрегація. Такі явища зміни сировини при екструзійному обробленні повинні ще більше покращувати свої властивості при деформаціях. В результаті порушення конформації за рахунок механічного впливу на поверхні можуть з'явитися неполярні радикали. Полярні групи при нагріванні набувають певної кінетичної енергії і здатні взаємодіяти між собою, а не з молекулами розчинника. Все веде до зниження гідратаційної здатності та розчинення денатурованих білків [6].

Таблиця 5.2

Фракційний склад білка сировини і екструдатів

Зразок	Загальний вміст білка, %	Вміст, % від загального білка				
		Альбуміни	Глобуліни	Проламіни	Глютеніни	Нерозчинний осад
1	2	3	4	5	6	7
Пшениця	11,4	16,8	4,9	28,0	30,8	6,2
Кукурудза	6,8	19,3	11,3	34,1	22,9	12,3
Екструдоване кукурудзяне борошно	6,1	10,3	12,5	36,1	23,1	17,8

Встановлено, що екструзійна обробка борошняної сировини збільшує її термін зберігання за рахунок часткової інактивації ферментів [6]. Термічна дія на компоненти сумішей не знижує їх здатності до перетравлення при будь-якому виді обробки, а для деяких сумішей вона навіть підвищується при

використанні методу високотемпературного екструдуювання. Практично у всіх роботах присвячених вивченню харчової та біологічної цінності екструдатів відзначається підвищення їх цінності після екструзії [7, 9, 10].

При екструзійній обробці певних змін зазнають вітаміни. У Німеччині проведено дослідження впливу режимів екструзії на вміст вітамінів. При обробці вітамінізованої суміші на екструдері встановлено, що вітаміни В₁, В₆, В₁₂ і фолієва кислота зберігається краще при вологості сировини 17–25%. Втрати вітамінів В₁, В₆, В₁₂ практично такі ж, як при випіканні хліба, а втрати фолієвої кислоти – дещо вищі.

Зміни, що відбуваються в борошняній сировині під час екструзійного оброблення неможливо розглядати без вивчення властивостей крохмалю в процесі гідротермічного оброблення.

Крохмаль – це найважливіший вуглевод в денному раціоні людини, зазвичай складає 80–85% загальної кількості вуглеводів. Крохмаль – це полісахарид глюкози, який не є хімічно індивідуальною речовиною, а складається з 2-х полісахаридних фракцій – амілози та амілопектину.

Розмір молекул, міцність і компактність зерен, полісахаридний склад, тип глюкозидних зв'язків обумовлюють його фізико-хімічні властивості. На відміну від інших біополімерів молекули полісахаридів, що входять до складу крохмалю, за хімічною структурою не однакові хоча і складаються з однакових структурних одиниць. Амілоза та амілопектин значно відрізняються за молекулярною масою та частіше за все знаходяться у співвідношенні 1:3.

Крохмаль накопичується в рослинах у вигляді зерен, розміри та форма яких варіюють у широких межах [7]. Полісахариди в крохмальному зерні зв'язані між собою головним чином водневими зв'язками. Структурна упорядкованість в кристалах крохмалю досягається за рахунок водневих зв'язків, що виникають безпосередньо між гідроксилами сусідніх ланцюгів, або за участю молекули води, що відіграє значну роль в утворенні кристалів крохмалю. Із збільшенням масової частки вологи крохмалю ступінь його упорядкованості підвищується, при цьому зростає кількість водневих зв'язків.

Крохмальні зерна мають неоднорідну за міцністю структуру, зв'язану перш за все, з особливостями синтезу крохмалю. Наявність ОН-груп в полісахаридах крохмалю забезпечує через водневі зв'язки механо-хімічну стійкість крохмальних зерен.

В природному стані крохмальні зерна не розчинні у холодній воді, майже не набрякають, але сорбують до 50% води. Процеси набрякання та клейстеризації крохмалю залежать від впливу зовнішніх умов – швидкості підвищення

температури, механічної дії, присутності електролітів, а також від розміру зерен та стану крохмальних полісахаридів, які можуть змінюватися в результаті руйнування або утворення структури [15]. Підвищення температури веде до розриву міжмолекулярних зв'язків в зернах крохмалю, в результаті чого збільшується гідратація полісахаридів, відбувається клейстеризація крохмалю [15].

З підвищенням температури набрякання зерен, що мають однакові розміри, виникає певний температурний інтервал в якому відбувається клейстеризація крохмалю, що використовується для характеристики окремого виду крохмалю. Проте, клейстеризація крохмалю в екструдері дещо відрізняється, оскільки зумовлено трьома факторами: наявністю значного механічного впливу на матеріал, малим вмістом вологи і високою температурою обробки [9]. За таких умов відбувається термомеханічна деструкція зерен крохмалю та його полісахаридних молекул, в той час, як набухання та розчинення у воді обмежено.

Встановлено, що майже вся волога зерна (80% від загального вмісту) – слабозв'язана. Під час екструзійного оброблення при значних температурах, ця вода перетворюється в пару, при цьому молекули води володіють великою кінетичною енергією і можуть проникати в середину крохмалевмісної сировини і слабо зв'язуватися активними центрами біополімерів [16]. Все це викликає пластифікацію маси, внаслідок інтенсивного механічного перемішування.

Через недостатньо високий вологовміст маси при взаємодії з парою крохмаль набухає і частково клейстеризується. Цей колоїдний процес аналогічний до того, що відбувається в м'якуші хліба привипіканні, де суттєву роль відіграє крохмаль, що поглинає воду.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, про те що крохмаль який складає 65–70% маси сухих речовин крохмалевмісної сировини в результаті дії вологи, температури та механічних напружень зазнає складних перетворень, що приводить до зміни його фізико-хімічних властивостей. Екструзійні крохмалі характеризуються більшою розчинністю, меншою здатністю до злипання в порівнянні з желатинізованими.

Досліджено, що в процесі екструзії спостерігається значне зменшення кількості крохмалю на фоні значного нагромадження декстринів (табл. 5.3). Даний процес свідчить про глибокі зміни в будові полісахаридів крохмалю, які пов'язані з розривом глюкозидних зв'язків.

Руйнування крохмалю може відбуватися за рахунок теплового гідролізу та внаслідок механічної деструкції. В першому випадку утворюються групи декстринів з рівномірним ступенем полімеризації, оскільки цей процес

залежить від енергії зв'язку молекул глюкозидних залишків, в другому випадку розрив ковалентних зв'язків носить випадковий характер тому відбувається утворення декстринів з різною кількістю глюкозидних залишків.

Таблиця 5.3.

Зміни кількості крохмалю та декстринів в процесі екструзії

Зразок	Кількість крохмалю, % на СР		Кількість декстринів, % на СР	
	до екструзії	після екструзії	до екструзії	після екструзії
Пшениця	54,3	44,1	3,28	21,4
Кукурудза	56,9	38,7	1,04	23,04

В результаті цих процесів відбувається накопичення значної кількості водорозчинних вуглеводів з різним ступенем полімеризації, що підвищує харчову цінність виробів [4].

5.2.2. Особливості технології виготовлення безглютенових напівфабрикатів

Целіакія – це хронічне захворювання, що характеризується пошкодженням слизової оболонки тонкої кишки глютенем – рослинним білком клейковини, що міститься в злакових.

Шкідливу дію глютену (його основної частини – гліадину) встановлено ще в 1950 році, але патогенетичний механізм все ще залишався нез'ясованим. Згідно із першою ензимотоксичною гіпотезою допускається наявність вродженого дефіциту деяких протеолітичних ензимів, в результаті чого не проходить нормальне розщеплення і резорбція гліадину і накопичуються токсичні продукти розпаду, що пошкоджують структуру і функції слизової оболонки тонкого кишківника. В результаті цих порушень розвивається синдром порушення абсорбції. Виявлено у хворих пониження активності пептидази і дисахаридази, за своєю сутністю не первинне а вторинне явище. При протеолітичному розщепленні глютену можливе ізолювання пептидної фракції, що володіє токсичною дією. Ця пептидна фракція із слизової, ураженої целіакією, що знаходиться в стані ремісії, розщеплюється повільніше, ніж при

нормальній слизовій. Утворена фракція пригнічує регенерацію плоских клітин слизової в тканинній культурі.

Друга гіпотеза – імуно-алергічна. Вона ґрунтується на положенні, що імунопатологічний процес розвивається на різних рівнях (клітинному та системному) складної імунної системи. Важливе значення мають епітеліальні клітини тонкого кишківника і тісно зв'язана з ними лімфоїдна тканина тонкого кишківника, яка приймає активну участь у відповіді на імунологічні гліадинові ураження в тонкому кишківнику.

В основі лікування та профілактики целиакії лежить елімінаційна дієтотерапія – тобто повне виключення продуктів, що містять глютен чи його сліди, із раціону харчування людини, так звана аглютенітова дієта (АГД), яка призначається по життєво. Довготривале захворювання може привести до виснаження організму, до білкової і мінеральної недостатності, розвитку анемії, та авітамінозів. В таких ситуаціях особливо гостро існує необхідність проведення профілактики з раннього віку. Безглютенітовими злаковими вважаються рис, гречиха, пшоно та кукурудза.

За останні десятиліття виріс попит на безглютенітові продукти харчування, кількість споживачів, які мають проблеми з перетравлюванням клейковини виросла приблизно на 10%. І хоча у цих людей різна міра чутливості до глютену, проте загалом стан їх покращується при дотриманні безглютенітової дієти. Приблизно 1% населення страждає алергією на глютен.

Аналіз літератури показав, що при виробництві безглютенітових виробів використовують суміші різних гідроколоїдів, поєднання яких забезпечує потрібні технологічні властивості тіста і якість готових виробів. В якості системи таких гідроколоїдів, на основі літературних даних, запропоновано картопляний крохмаль, соєвий білковий ізолят і природний полісахарид ксантанова камідь.

Останніми роками зростає кількість людей, що хворіють на целиакію. За даними Всесвітньої Гастроентерологічної Організації (World Gastroenterology Organization; WGO), поширеність целиакії у світі 1:300 людей.

Нетоксичними злаками при целиакії вважаються рис, гречка, пшоно, кукурудза, а також менше поширені в нашій території – амарант, кіноа, саго, монтіна, чуміза, сорго. Склад раціону хворого целиакією залежить від віку та важкості захворювання, але будується на основних загальних принципах: вуглеводневий компонент складають за рахунок допустимих злаків, картоплі, бобових, овочів, фруктів, ягід; білковий і жировий – за рахунок м'яса, яєць, риби, молочних продуктів, рослинного та вершкового масла. Отже, в

харчуванні хворих целіакією рекомендується використовувати спеціалізовані безглютенові продукти, виготовленні із гречаного, рисового, кукурудзяного борошна, картопляного, кукурудзяного чи рисового крохмалів і т.п. вміст глютену в таких продуктах відповідно Codex Alimentarius(CODEX STAN 118-1979, ALINORM 08/31/26 para 64, appendix III не повинен перевищувати 20 мг/кг продукту.

У роботі [24] розроблено принципи формування рецептурного складу безглютенових сумішей для випікання на основі кукурудзяного крохмалю, що дозволяють оптимізувати співвідношення структуроутворювачів і розрихлювачів за рахунок синергізму їх дії з подальшим введенням борошна в різних співвідношеннях з метою розширення асортименту хліба, печива, макаронних та бубликових виробів. Розроблені та експериментально обґрунтовані інноваційні технологічні прийоми виробництва борошняних кондитерських виробів (бубликів) з розробленої суміші для випікання, які розглядаються в подальшому.

Класичні рецептури безглютенового хліба основані на рисовому та кукурудзяному борошні в комбінації з білковими ізолятами, переважно соєвими. В якості коректорів реологічних властивостей дисперсій (тісто, готовий виріб) використовують такі гідроколоїди, як ксантан, модифіковані крохмалі в кількості 1–3% від маси борошна. Головним недоліком борошняних виробів за описаними рецептурами є низька харчова цінність, зумовлена високим вмістом крохмалю, низьким вмістом харчових волокон, вітамінів, мінеральних нутрієнтів. На думку авторів вдосконалення технології борошняних кондитерських виробів повинно ґрунтуватися на наступному: по-перше, на дослідженні хімічних властивостей різних видів крохмалю (зокрема визначення співвідношення амілози та амілопектину), по-друге, на розробці способів збагачення борошняних виробів незамінними макро- та мікронутрієнтами. Моделювання безглютенових продуктів повинно здійснюватися не лише з врахуванням комбінування мікроелементів та біологічно активних речовин, але і в технологічно оправданих поєднаннях, що сприятиме формуванню споживчих властивостей виробів.

Одним з перспективних методів підвищення харчової цінності зернових продуктів є використання спеціальних методів технологічної обробки зернової сировини, зокрема екструзії. Високу харчову та технологічну цінність екструдованої борошняної сировини зумовлюють фізико-хімічні перетворення основних складових речовин, що відбуваються в процесі екструзійної обробки. Зокрема, підвищується стабільність жирів борошняної сировини,

завдяки тому, що такі ферменти, як ліпаза, що викликають гіркуватий смак рослинних жирів, руйнуються в процесі екструзії, а лецитин та токофероли, що є природними стабілізаторами, зберігають активність. Клітковина в процесі механічної обробки у екструдері подрібнюється, а крохмаль частково декстринізується. Крім цього, під дією температури і тиску відбувається стерилізація борошняної сировини, що підвищує її санітарний статус, а негативний вплив зведений до мінімуму.

У відповідності з МР 2.3.1.2432-08 і ААСС International збалансований за харчовою цінністю продукт повинен містити основні харчові речовини в наступних відсоткових співвідношеннях: 13% білка, 14% жиру, 60% вуглеводів і 5% харчових волокон [33].

Оскільки, елімінаційна дієта при целиакії повинна носити строгий і безкомпромісний характер і продовжуватися пожиттєво, тому існує потреба в розробці бубликів для дієтичного споживання – безглютенового, що відповідатиме можливостям, смакам і традиціям вітчизняного споживача. При цьому важливою умовою створення рецептурної композиції повинна бути висока харчова та біологічна цінність, поряд з низькою собівартістю.

5.3.Методи дослідження

Під час виконання досліджень використовувалися стандартні, загальноприйняті, спеціальні та модифіковані фізико-хімічні, мікробіологічні та органолептичні методи дослідження.

Якість пшеничного та екструдованого кукурудзяного борошна встановлювали на підставі результатів аналізу середньої проби, яку склали згідно з ГОСТ 27668-88. У ньому оцінювали наступні показники: вологість, кількість і фізичні властивості відмитої клейковини. Характеристика партій борошна, що були використані в експериментальних дослідженнях наведена у таблиці 5.4. Вміст водорозчинних вітамінів В1 і В2 в борошні визначали флюорометричним методом. Суть полягає в екстракції вітамінів з наважки борошна розчином сульфатної кислоти, окисненні його розчином заліzosинеродистого калію у тіохром, екстракції окисненої форми з водної фази ізобутиловим спиртом та вимірюванні інтенсивності флуорисценсії [1]. Вміст вітаміну РР – калориметричним методом [1].

Таблиця 5.4

Показники якості пшеничного борошна, що використовували під час проведення експериментів

Номер партії борошна	Кількість сирової клейковини, %	Стислість клейковини на приладі ІДК, од. пр	Вологість борошна, %
1	23,0±0,9	60,8±2,0	13,4±0,4
2	24,0±0,9	68,0±2,0	12,8±0,4
3	23,5±0,9	63,5±2,0	11,5±0,4
4	23,8±0,9	64,2±2,0	12,6±0,4

Амінокислотний склад борошна і готових виробів оцінювали на амінокислотному аналізаторі шведської фірми LKB-4151 «Альфа плюс» у відповідності з методикою викладеною в інструкції до приладу. Амінокислотний скор білків та ступінь збалансованості амінокислот визначали методом, запропонованим ФАО/ВООЗ [2]. Фізичні властивості клейковини досліджували на приладі ІДК-5 [2].

Біологічну цінність борошна і готових напівфабрикатів визначали по амінокислотному скору. Водопоглинальну здатність борошна визначали виходячи із здатності борошна поглинати певну кількість води при замісі тіста до нормальної консистенції [2]. Вологість тіста та м'якушки готових виробів визначали експресним методом за допомогою вологоміру Чижової (апарат сушильний АПС-1).

Структурно-механічні властивості тіста включають в себе пружно-еластичні та в'язко-пластичні властивості. Пружно-еластичні властивості тіста визначали за допомогою фаринографа фірми «Брабендер», що описує процес утворення тіста і поведінку його в умовах безперервної механічної обробки [3], а в'язко-пластичні його властивості – на альвеографі фірми «Chopin». (ГОСТ 28795-90, ІСО 5530-4-83).

Дослідження в'язкості тіста, проводили на ротаційному віскозиметрі «Реотест-2». Беручи до уваги в'язкість маси використовували циліндр марки Н (для тіста). Дотичну напругу розраховували за формулою:

$$\sigma = z \times \alpha \times 0,1 \quad (5.1)$$

де σ – дотична напруга, Па;

z – константа циліндра, $z = 5,85$;

α – значення шкали індикаторного приладу.

По розрахованій дотичній напрузі і відповідній величині швидкості зсуву обчислювали ефективну в'язкість за формулою:

$$\eta_{ef} = \frac{\sigma}{\gamma}. \quad (5.2)$$

де η_{ef} – ефективна в'язкість, Па·с;

γ – градієнт швидкості зсуву, с⁻¹.

На основі побудови первинної реограми $\sigma = f(\gamma)$ по точці пересічення кривої з віссю абсцис ($x = 0$) будували криві течії залежності дотичної напруги зсуву до швидкості зсуву. За результатами вимірювань і проведених розрахунків будували повні реологічні криві, що показують залежність ефективної в'язкості від дотичної напруги зсуву $\eta_{ef} = f(\sigma)$. Математичну обробку отриманих на ротаційному віскозиметрі «Реотест-2» результатів здійснювали за допомогою Microsoft Excel 2003.

Масу тіста і готових напівфабрикатів встановлювали зважуванням на вагах лабораторних з точністю до 0,01 г. Пористість випечених напівфабрикатів досліджували за допомогою приладу Журавльова (ГОСТ 5669-96) [4]. Густина випечених напівфабрикатів визначали, як відношення маси до їх об'єму (кг/м³). Питомий об'єм виробів розраховували як відношення їх об'єму до маси (м³/кг).

Упікання визначали, як різницю між масою тіста до випікання і масою готового напівфабрикату за формулою [3].

$$U = \left(\frac{(M_m - M_{zg})}{M_m} \right) \times 100\% \quad (5.3)$$

де U – упікання, %

M_m – маса тіста до випікання, г;

M_{zg} – маса готового напівфабрикату, г.

Граничну напругу зсуву напівфабрикатів визначали на пенетрометрі «Labog» (Угорщина) за методикою [3]. Вимірювання глибини проникнення конусу приладу у товщу зразка проводили за тривалості проникнення 5 с. Показник граничної напруги зсуву незруйнованої структури (Q_0 , Па) розраховували за формулою Ребіндера:

$$Q_0 = \frac{k \times (m \times g)}{h^2} \quad (5.4)$$

де k – константа індентора, що залежить від кута α при вершині ($\alpha=45^\circ$, $k=0,286$);

m – маса індентора та стержня приладу, кг;

g – прискорення вільного приладу, м/с²;

h – глибина занурювання індентора, м.

Органолептичну оцінку якості виробів та комплексну оцінку якості проводили за допомогою методів кваліметрії [27, 28, 29].

Розробку рецептури та технології кондитерської продукції здійснювали відповідно до методичних рекомендацій з розробки рецептур, а також керуючись ДСТУ 3946 «Продукція харчова. Основні положення», наказом Міністерства економіки України № 210 від 25.09.00 р. «Про порядок розробки та затвердження технологічної документації на фірмові страви, кулінарні і борошняні кондитерські вироби в підприємствах громадського харчування».

Під час проведення досліджень реалізовано методологію системного підходу, яка дозволяє об'єднати в єдине ціле різноманітні методи дослідження, представити об'єкт дослідження у вигляді систем та підсистем різного рівня, вивчити їх функціонування на макро- (взаємодія з навколишнім середовищем) і мікрорівні (дослідження внутрішніх характеристик) [4].

Для об'єктивного аналізу про ступінь вірогідності отриманих даних проводили математичну обробку результатів дослідження [5]. Статистична обробка результатів паралельних вимірювань перелічених вище показників проводилася загальноприйнятими методами, тобто визначення середнього арифметичного X , середнього квадратичного відхилення окремого результату (стандартне відхилення) S і середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного (стандартна похибка) S_x .

Обчислення здійснювали за формулами:

$$X = \frac{\left(\sum_1^n X_i \right)}{n} \quad (5.4)$$

$$S = \frac{\left(\sum_1^n X_i - X \right)^2}{n-1} \quad (5.5)$$

$$S_x = \frac{S}{n} \quad (5.6)$$

де X_i – результат окремого вимірювання;

n – кількість вимірювань.

Результати вимірювання X_i , абсолютне відхилення яких від середнього арифметичного X перевищувало величину $3S$, відкидалися, як недостовірні. Точність вимірювань (абсолютна погрішність X) визначалася з надійністю $d=0,95$ за формулою:

$$X = S_x \times td$$

td – коефіцієнт Стьюдента із табличних даних.

Величина X визначала інтервал $x \pm x$, в якому з 95%-вою ймовірністю знаходиться результат вимірювання X . Похибку методу оцінювали величиною відносної помилки у відсотках:

$$E = \frac{X}{X} \times 100\%$$

Відносна похибка вимірювання, які наводяться в роботі складала:

- для в'язкості – 1%;
- для органолептичних показників – 10%;
- для показників, що визначаються методом ЯМР – 5%.

Швидкість (V) протікання процесів оцінювали за зміною розрахункових значень за одиницю часу:

$$V = \frac{X}{T} = tgd$$

X – зміна абсолютних значень показника за певний період;

T – тривалість періоду, для якого контролювали X ;

d – кут нахилу дотичної до кривої зміни показника в досліджуваній момент часу.

Статистичну обробку даних здійснювали за допомогою програми Microsoft Office Excel 2003. Оптимізацію технологічних параметрів здійснювали за методом найменших квадратів за допомогою стандартного програмного пакету MathCad.

5.4. Теоретичне обґрунтування використання екструдованого кукурудзяного борошна в технології нагнітання

Перспективним напрямком розширення асортименту борошняних кондитерських виробів є створення напівфабрикату бубликів з повною заміною пшеничного борошна вищого ґатунку, що містить глютен на екструдоване кукурудзяне борошно.

Популярність здорового харчування постійно зростає. Це потребує створення виробів, в рецептурі яких наявні інгредієнти з оздоровчими властивостями. В склад тканин людського організму входять мінеральні сполуки, що становлять біля 3,5% його маси. Тому при споживанні харчових продуктів, вони повинні містити в необхідній кількості солі фосфору, кальцію, заліза та ін.. Добова потреба організму людини в мікроелементах вимірюється в міліграмах (цинк – 10...15, марганець – 5...10, мідь – 2, молібден – 0,5). Їх фізіологічна цінність досить значна, так як ці мікроелементи відіграють роль коферментів деяких ферментних систем.

Враховуючи напрями технологічного процесу в харчовій промисловості, що визначаються, зокрема, державною політикою в галузі здорового харчування, економічними та соціальними змінами у суспільстві, новими технологічними можливостями, конкуренцією на продовольчому ринку, виникає потреба не лише в удосконаленні технології традиційної харчової продукції, але створення продуктів нового покоління, що відповідають сучасним вимогам, збагачені важливими нутрієнтами та із збільшеним терміном зберігання. Напівфабрикати борошняних кондитерських виробів є основою чи складовою частиною продукції, а значний попит населення на ці вироби дозволяє вважати їх важливими продуктами харчування [1].

Сьогодні, зокрема, асортимент безглютенових продуктів харчування вітчизняного виробництва є недостатнім [2, 3]. З метою вирішення питання харчування хворих на целиакію в Україні сертифіковані продукти фірми «DR.SCHAR» Італія, «BEZGLUTEN», Польща, «3PAULY», Німеччина, але застосування їх обмежується високою ціною. Одним з перспективних напрямів розширення асортименту борошняних кондитерських виробів є створення напівфабрикату бубликів з повною заміною пшеничного борошна вищого ґатунку, що містить глютен на екструдоване кукурудзяне борошно (ЕКБ).

Борошно кукурудзяне має цінні активні речовини. В його хімічному складі присутні важливі для організму поліненасичені жирні кислоти, токоферол, β -каротин, фолієва кислота, вітаміни групи В, РР, кальцій, магній, залізо та група

мікроелементів – кремній, мідь, нікель. Ці важливі складові рекомендовано для споживання людям, що мають захворювання крові, алергію, цукровий діабет та інші форми порушення обміну речовин. Відомо [4], що наявність кремнію в кукурудзі сприяє підвищенню еластичності кровоносних судин та зміцненню зубів. Наявність в складі кукурудзяного борошна глютамінової кислоти і фітину дозволяють продукти споживати при захворюванні центральної нервової системи, депресії та інших нервових захворюваннях. Використання даного борошна в рецептурі борошняних кулінарних та кондитерських напівфабрикатів зумовлюватиме надання виробам оздоровчих властивостей.

Основною причиною, що затримує широке використання продуктів переробки кукурудзи у хлібопекарському і кондитерському виробництві є відчутна відмінність властивостей борошна. Так, білки кукурудзи представлені проламінами і глютелінами (зеїн) складають 60% від усіх білків. Ці білки слабо набухають і не утворюють клейковини, решта близько 40%-водорозчинні білки. Крохмаль кукурудзяного борошна клейстеризується за вищої температури, легше атакується амілазами, містить менше власних цукрів, меншу цукроутворювальну і газоутворювальну здатність [4]. Низка досліджень ряду науковців розробили заходи використання суміші пшеничного та кукурудзяного борошна при додержанні перед замішуванням додаткової обробки кукурудзяного борошна [5]. Вони полягають на замочуванні, заварюванні, заквашуванні мезофільними або термофільними молочнокислими бактеріями, додаванням в тісто неферментованого солоду, фосфатів, концентратів. Проте, ці заходи подовжують тривалість технологічного процесу і не забезпечують значного ефекту покращення якості продукції при значних витратах. Останнім часом науковці почали розробляти заходи з використанням молочної сироватки [4].

Наявність фундаментальних розробок в області одержання і використання різних типів екструдованого борошна у виробництві продуктів харчування вказує на можливість застосування його в технології напівфабрикату виробництва бубликів [6, 7, 8]. Використання інгредієнтів рослинного походження, зокрема нетрадиційних видів борошна, які могли б надати виробу цінні харчові властивості, може вважатися перспективною розробкою, що цікавитиме виробників кондитерських та хлібобулочних виробів. Адже, зважаючи на цінний хімічний склад ЕКБ можна прогнозувати позитивний вплив цієї сировини на перебіг технологічного процесу. Тому наш задум розробки полягає у встановленні характерних відмінностей, взаємовідносин пшеничного і екструдованого кукурудзяного борошна (ЕКБ) в технології кондитерських та хлібобулочних виробів.

Для аналізу споживчих властивостей та встановлення реологічних залежностей, свої дослідження спрямували в такій послідовності, щоб обґрунтувати доцільність використання ЕКБ.

5.4.1. Порівняльний аналіз хімічного складу пшеничного та екструдованого кукурудзяного борошна

Борошно – це одне з основних видів сировини в борошняних кондитерських виробках. Вивчення його харчової і біологічної цінності суттєво впливає на якість готових виробів в цілому. Порівняльний аналіз хімічного складу пшеничного та екструдованого кукурудзяного борошна в таблиці 5.5.

Аналіз даних табл. 5.5 свідчить, що за вмістом сухих речовин досліджуване борошно значно відрізняється від борошна пшеничного вищого гатунку. Значна частина сухих речовин це вуглеводи, що характерно для будь-якої зернової сировини. Зокрема, вміст крохмалю в ЕКБ більший на 3%, вміст білка менший на 5% у порівнянні з пшеничним борошном. Характерною особливістю ЕКБ є підвищений в порівнянні з пшеничним борошном вміст золи та клітковини. Так, ЕКБ містить золи на 4,3% більше ніж пшеничне, а кількість клітковини у ЕКБ становить – 1%, що у 10 разів більша ніж у пшеничному.

Таблиця 5.5

Хімічний склад екструдованого кукурудзяного борошна та пшеничного борошна вищого гатунку, %

Продукт	Вміст вологи	Вміст білків	Вміст жирів	Вміст крохмалю	Вміст золи	Вміст клітковини
Екструдоване кукурудзяне борошно (ЕКБ)	9,0±0,01	6,1±0,02	8,1±0,02	70,9±0,03	4,8±0,03	1±0,02
Пшеничне борошно вищого гатунку *(ПБ)	14,5±0,03	11,4±0,05	1,08 ±0,04	67,7±0,05	0,5±0,03	0,1±0,01

Незважаючи на наявність в ЕКБ клейковинних фракцій білка – проламінової та глютенінової, вони не утворюють клейковину подібно до білків пшениці, а володіють своїми фізичними, хімічними властивостями і

біологічною цінністю. Цей факт спонукав не лише дослідити амінокислотний склад білків ЕКБ, але й розглянути можливість створення напівфабрикату безглютенового – оздоровчого призначення.

Збалансованість амінокислотного складу, його первинна структура, зокрема вмісті кількісне співвідношення незамінних амінокислот, є одним з найважливіших показників харчової цінності борошна. Розглядаючи вміст амінокислот в борошні та порівняння з фізіологічними нормами харчування, встановлено, що у більшості білків хлібних злаків співвідношення амінокислот відрізняється від оптимального. Найчастіше існує дефіцит лізину, метіоніну та триптофану [9]. Завдяки екструзійній обробці в ЕКБ збільшується доступність амінокислот для засвоєння. Це відбувається внаслідок руйнування в молекулах білка вторинних зв'язків. Завдяки відносно невисокій температурі екструзії та короткочасній тепловій обробці амінокислоти при цьому не руйнуються [10].

5.4.2. Порівняння амінокислотного складу пшеничного борошна вищого гатунку та ЕКБ

Аналіз показує, що останнє переважає за вмістом наступних амінокислот: лейцин, аланін, аспарагінова кислота, тирозин на $3,5 \pm 0,3\%$; $5,1 \pm 0,2\%$; $4,6 \pm 0,4\%$; $2,0 \pm 0,5\%$ відповідно. Порівняльний аналіз амінокислотного складу досліджуваних зразків борошна показує, що ЕКБ перевищує пшеничне борошно за вмістом метіоніну на 9%, а вміст фенілаланіну разом з тирозином та ізолейцину з лейцином близький до стандарту. Харчова цінність продуктувища, наскільки в більшій степені його хімічний склад відповідає формулі збалансованого харчування. Порівняльний аналіз отриманих результатів харчової цінності ЕКБ і відповідності її формулі збалансованого харчування дозволяють зробити висновок, що ступінь задоволення формули збалансованого харчування за рядом показників вища у дослідного зразку ЕКБ в порівнянні з борошном пшеничним вищого гатунку.

Об'єктом дослідження мікробіологічних показників було ЕКБ. Проби для досліджень відбирали із партії свіжого ЕКБ та через шість місяців зберігання. Як показують дослідження одним із шляхів покращення мікробіологічних показників кукурудзяного борошна може бути екструзійна обробка, яка крім фізико-хімічних змін приводить до загибелі практично всіх мікроорганізмів, що містяться в сировині. Оброблена таким чином сировина може бути використана в технології кондитерських і хлібобулочних виробів.

Таблиця 5.6

Мікробіологічні показники екструдованого кукурудзяного борошна

Найменування продукту	Кількість клітин в одному грамі продукту				
	МАФМ	Спороутворюючі бактерії	Дріжджі	Міксоміцети	БГКП
Екструдоване кукурудзяне борошно свіже	$2,5 \cdot 10^1$	$1,0 \cdot 10^1$	$2,0 \cdot 10^1$	$3,0 \cdot 10^1$	0
Екструдоване кукурудзяне борошно через шість місяців зберігання	$1,8 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^1$	$4,0 \cdot 10^1$	$1,2 \cdot 10^2$	0

Бактеріальні дослідження всіх груп мікроорганізмів показали, що екструзійні продукти зберігають свою стерильність протягом 180 діб [11]. Результати дослідження мікробіологічних показників ЕКБ наведено в таблиці 5.6.

Як видно з табл. 3.6 екструзійна обробка зернової сировини методом гарячої екструзії ($t=135-155^{\circ}\text{C}$, $P=6-7$ атм. тривалість 45-60 сек.) сприяє отриманню практично стерильного борошна. В ЕКБ не виявлено бактерії роду *Salmonella*, що утворюють характерні колонії на густих диференціальних середовищах і мають біохімічні та серологічні характеристики, встановлені відповідно до СТ СЭВ 5209-85.

5.4.2.1. Вивчення впливу ЕКБ на властивості крохмалю борошняних сумішей

Поряд із білковими речовинами крохмаль борошна відіграє істотну роль у формуванні тіста. Чим більша кількість крохмалю (за однакових умов), тим вищі переваги борошна. Крохмальні зерна суттєво відрізняються за розмірами, формою, та властивостями. Вони відрізняються за вологоємністю, швидкістю оцукрювання, температурою клейстеризації. Так, з вологоємністю крохмалю пов'язують швидкість черствіння хлібобулочних виробів. Газоутворююча здатність борошна також залежить від швидкості накопичення цукрів, що утворюються в результаті гідролізу крохмалю. Від ступеня пошкодження

крохмальних зерен, обумовленою в тому числі і способом помолу, залежить дія на них амілолітичних ферментів.

Процес клейстеризації і активність амілолітичних ферментів крохмалю досліджували за допомогою амілографа. Цей прилад графічно відображає зміни в'язкості водно-борошняної суспензії при постійному підвищенні температури, а відповідно, характеризує зміни крохмалю в результаті його клейстеризації під дією амілаз, що знаходяться у борошні. З однієї сторони на характер амілограм впливають не лише властивості крохмалю і амілолітичних ферментів, але і властивості білково-протеїназного комплексу, та інших складових борошна. Проте, ряд досліджень свідчить, що вплив цих факторів на характер амілограм незначний у порівнянні з роллю і значенням стану крохмалю і амілолітичних ферментів.

З іншої сторони, важко визначити характер процесу клейстеризації крохмалю в складі борошна. Адже поведінка чистого крохмалю, ізольованого від борошняного середовища може суттєво відрізнитися від його поведінки безпосередньо в борошні і тісті. Із врахуванням цього, об'єктами дослідження стали борошно пшеничне вищого гатунку якості контролю, ЕКБ та їх суміші у різних співвідношеннях. Амілограми процесу набухання та клейстеризації наведені на рисунку 5.2, а їх числові показники в табл. 5.7.

Зміна температури клейстеризації є важливим показником, що характеризує наступний процес ретроградації крохмалю у процесі зберігання готових виробів, адже відомо, що чим нижча температура клейстеризації, тим довше вироби зберігають свою свіжість в процесі зберігання [12]. Температура початку клейстеризації, як видно з табл. 5.7, складає: для пшеничного борошна 58°C, а для ЕКБ 100% – 50°C. Таким чином, можна зробити висновок, що використання сумішей пшеничного і ЕКБ у виробництві бубликів дозволить збільшити строки зберігання останніх, так як температура клейстеризації крохмальної суспензії сумішей нижча ніж у контрольного зразка.

Таблиця 5.7

Вплив дозування екструдованого кукурудзяного борошна на властивості борошняних сумішей

Показники	Контроль	Дозування ПБ:ЕКБ				
		95:5	90:10	85:15	80:20	0:100
Максимальна в'язкість, од.пр.	640±10	920±10	895±10	740±10	550±10	270±10
Температура клейстеризації, °C	58±2	56±2	55±2	53±2	53±2	50±2
Хлібопекарська якість	чудова	дуже добра	дуже добра	добра	погана	погана

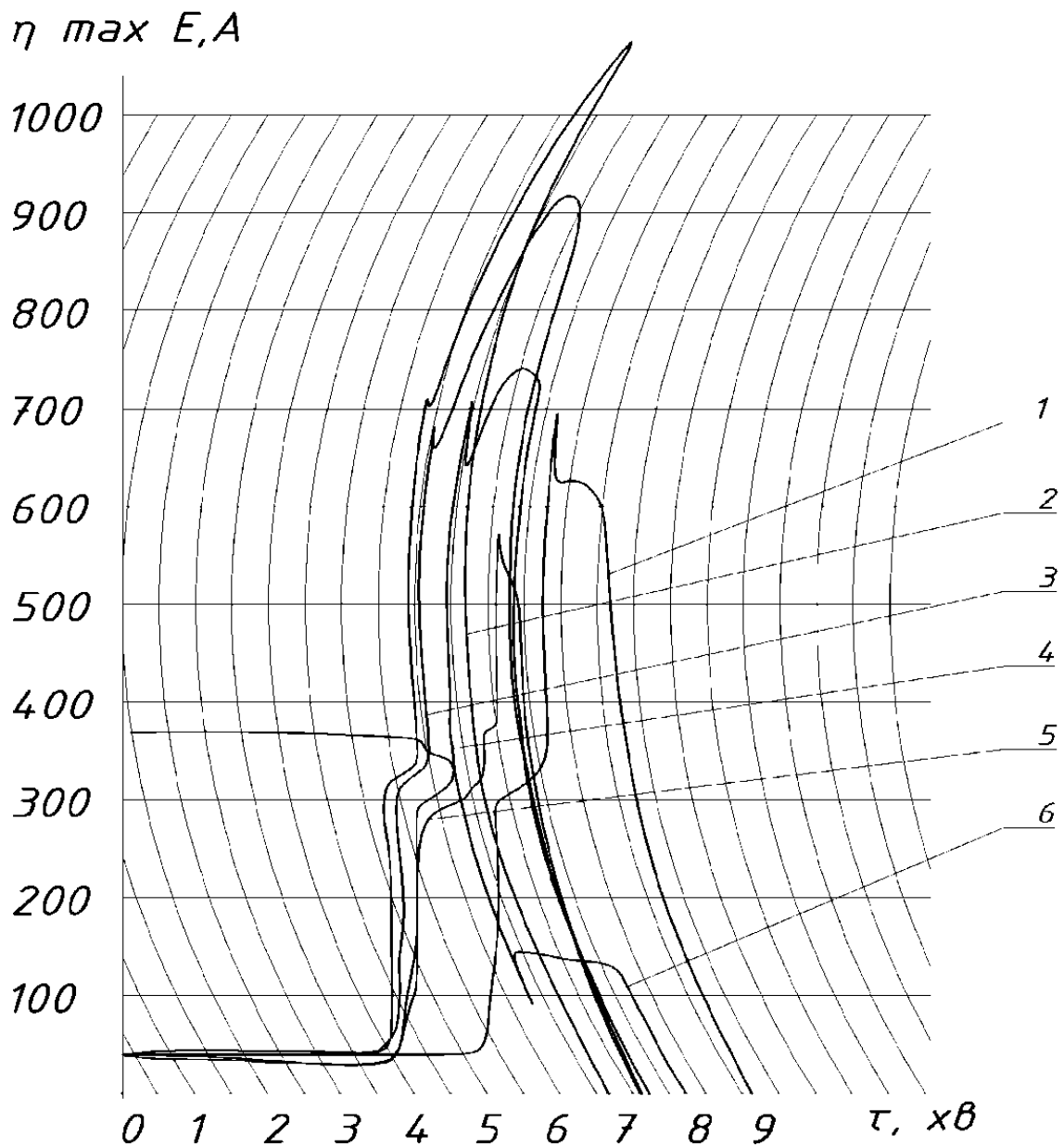


Рис. 5.2. Амліограми борошняних сумішей (ПБ) та екструдоване кукурудзяне борошно (ЕКБ) у співвідношеннях: 1 – ПБ:ЕКБ – 100:0%; 2 – ПБ:ЕКБ – 95:5; 3 – ПБ:ЕКБ – 90:10; 4 – ПБ:ЕКБ – 85:15; 5 – ПБ:ЕКБ – 80:20; 6 – ЕКБ – 100%

В'язкість є важливим технологічним показником для тіста, як пінної структури. Залежність максимальної в'язкості суспензії від вмісту ЕКБ у борошняних сумішах наведено на рис. 5.3.

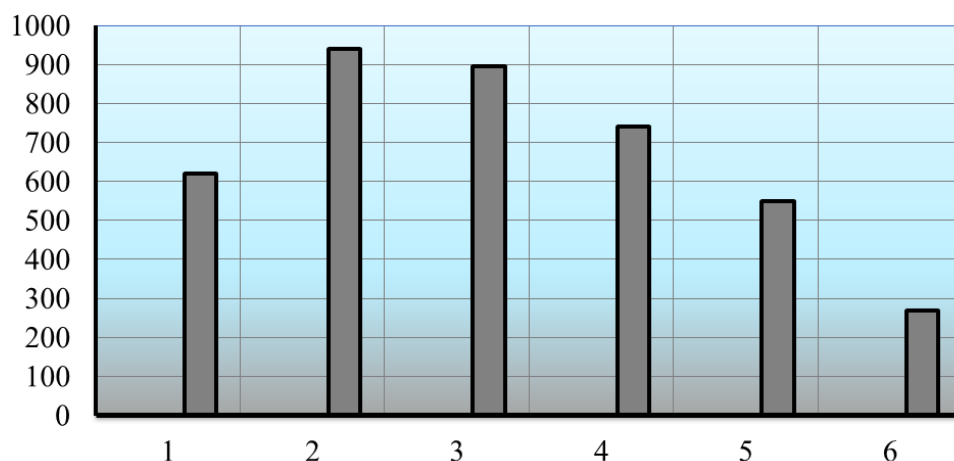


Рис. 5.3. Залежність максимальної в'язкості суспензії від вмісту ЕКБ у борошняних сумішах (пшеничне борошно вищого ґатунку та ЕКБ) у співвідношеннях: 1 – ПБ:ЕКБ – 100:0; 2 – ПБ:ЕКБ – 95:5; 3 – ПБ:ЕКБ – 90:10; 4 – ПБ:ЕКБ – 85:15; 5 – ПБ:ЕКБ – 80:20; 6 – ПБ:ЕКБ – 0:100

Висока структурна в'язкість визначає механічну стійкість тіста, тобто створення пружного каркасу, що надає системі певні фізико-хімічні властивості твердого тіла.

Залежність максимальної в'язкості суспензії від вмісту ЕКБ (рис. 5.3) дозволяє охарактеризувати властивості сформованого напівфабрикату бублика з використанням ЕКБ при випіканні. Пориста структура бублика закріплюється в результаті коагуляції клейковинних білків і перетворення крохмалю в густий студень. При додаванні 5 і 10% ЕКБ амілограма показує високу максимальну в'язкість, що свідчить про зв'язування крохмалем під час клейстеризації великої кількості води. В результаті утворюється малорозтяжний крохмальний студень та сухий – схильний до розтріскування.

При додаванні 100% ЕКБ амілограма (рис. 5.4.) показує нижчу максимальну в'язкість, що свідчить про те, що крохмаль під час набухання та клейстеризації зв'язує невелику кількість води, що знаходиться вільно в тісті та звільняється при коагуляції білкових речовин та сприятиме утворенню вологішого м'якуша напівфабрикату.

Оскільки, ЕКБ виготовлено методом гарячої екструзії, то пониження в'язкості борошняної суспензії пояснюється перетворенням частини крохмалю в декстрини, що володіють нижчою в'язкістю. Зниження в'язкості системи із збільшенням кількості ЕКБ також очевидно пов'язано із зменшенням частки клейковинних білків у борошняних сумішах та фракційним складом білків.

Відносно низька в'язкість говорить про доцільність застосування борошняних сумішей з використанням ЕКБ в технології виробництва бубликів,

пряників. Про дієтичні властивості даних сумішей зумовлені частково декстринізованим крохмалем, що сприятиме підвищенню харчової цінності готового бублика.

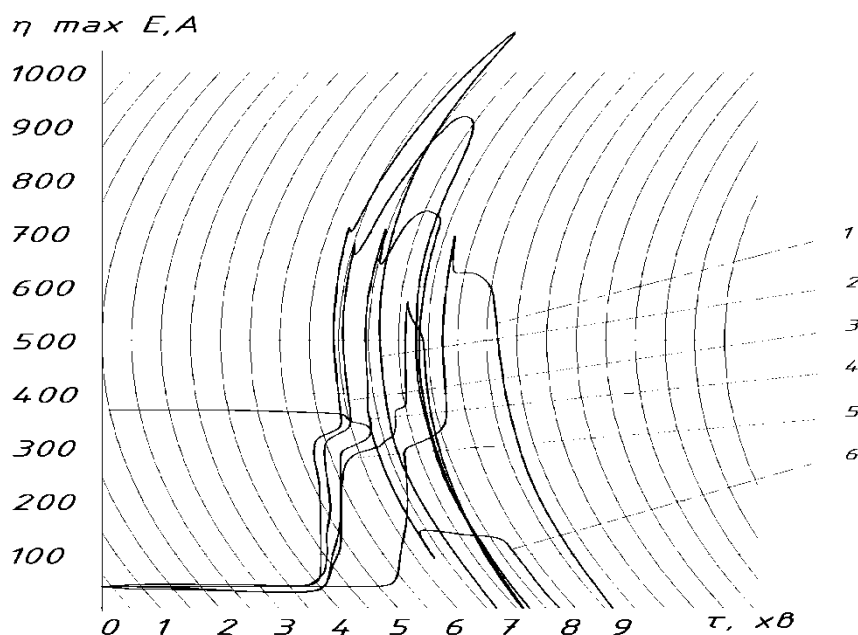


Рис. 5.4. Амліограми борошняних сумішей із пшеничного борошна (ПБ) та екструдоване кукурудзяне борошно (ЕКБ) у співвідношеннях:
 1 – ПБ:ЕКБ – 100:0%; 2 – ПБ:ЕКБ – 95:5; 3 – ПБ:ЕКБ – 90:10;
 4 – ПБ:ЕКБ – 85:15; 5 – ПБ:ЕКБ – 80:20; 6 – ЕКБ – 100%

Отже, можна зробити висновок, що використання отриманих результатів дозволить регулювати технологічні властивості борошняних сумішей залежно від концентрації в них ЕКБ і рекомендувати їх у виробництві борошняних кондитерських виробів оздоровчого призначення.

5.5. Вплив поверхні валків на процес отримання напівфабрикату з використанням ЕКБ

Білки зерна відіграють ключову роль у формуванні із тіста напівфабрикату та утворенні його структури, завдяки своїм високим гідрофільним, пружно-еластичним та поверхнево активним властивостям. Білки, що набухають у воді по суті є «каркасом» структури борошняного тіста. Завдяки великій молекулярній масі, значному вмісту та ниткоподібній будові первинної структури вони утворюють при відмиванні клейковину, що надає борошняному тісту вказані властивості.

Вивчення характеристики структури у сформованому напівфабрикаті бубликів клейковинних білків відіграє важливу роль, оскільки вони впливають на об'ємний вихід і форму готових виробів, структуру їх пористості. Між вмістом білків в борошні і величинами характеристик їх структури встановлена зворотна залежність, оскільки на властивості тіста впливає якість клейковинних білків і їх вміст у структурі. Кількість клейковинних білків у структурі оброблюваного тіста повинна бути оптимальною. Надлишковий вміст сприятиме розвитку пружно еластичних властивостей тіста, його об'ємного виходу, їх нестача знижує цю характеристику даючи надто густе пластичне тісто. Дослідження впливу ЕКБ в сумішах з борошном пшеничним для бубликового тіста потребує вивчення впливу білків досліджуваних зразків на зміни фізичних характеристик тіста.

Для експерименту використовували пшеничне борошно (ПБ) вищого гатунку (контроль), екструдоване кукурудзяне борошно (ЕКБ), і суміші цього борошна у різних співвідношеннях – ПБ:ЕКБ – 95:5, 90:10, 85:15, 80:20.

Вплив ЕКБ на структурно-механічні властивості тіста після деформації вивчали за допомогою приладу ИДК-5 результати вимірювань подано на рис. 5.5.

З рис. 5.5 видно, що при додаванні 5% ЕКБ показник стиснення залишається на рівні контролю, а вже для борошняної суміші з вмістом ЕКБ 15% показник стиснення підвищується на 23,3%. Слід зазначити, що при подальшому збільшенні вмісту ЕКБ структурно-механічні властивості клейковини борошняних сумішей зазнають незначних змін у порівнянні з контролем. Для суміші з вмістом ЕКБ 20% показник стиснення залишається практично на рівні контрольного зразку, але фомоутримуюча здатність зменшується, особливо при обробці в обшпарочних ваннах.

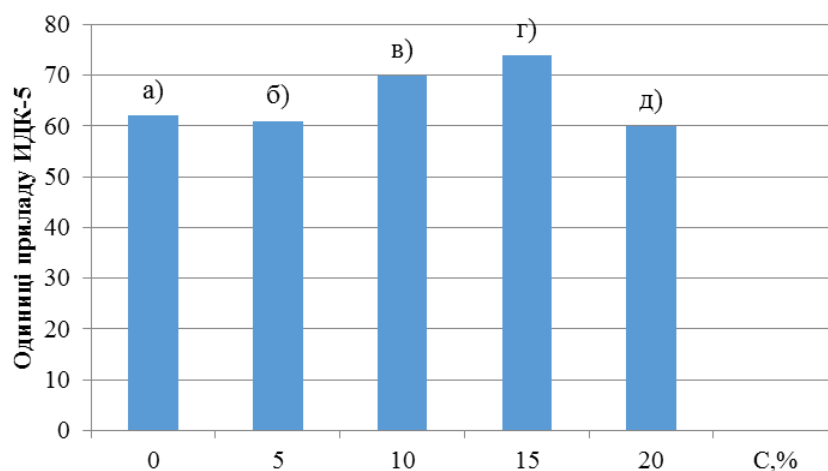


Рис. 5.5. Вплив вмісту (С, %) ЕКБ в суміші з ПБ на структурно-механічні властивості клейковини: а) ПБ:ЕКБ – 100:0%; б) ПБ:ЕКБ – 95:5%; в) ПБ:ЕКБ – 90:10%; г) ПБ:ЕКБ – 85:15%; д) ПБ:ЕКБ – 80:20%.

Спостерігається тенденція до розрідження тіста до 190 од. пр., коли у контрольному зразку цей показник рівний 40 од. пр. з одночасним збільшенням часу формотримання. Це може бути наслідком розчинення набухлих зерен екструзійно обробленого борошна, а також гідролітичного розщеплення крохмалю амілазами в процесі його деформацій під дією валків та формувального пристрою.

Властивості високої еластичності відіграють велику роль в процесі часткового бробіння і формування. Ці властивості сприяють утворенню і збереженню структури утвореної при формуванні. Їх залежність від дії валків (напруження P) з часом τ можливо визначити диференціальним:

$$P = \eta_e \frac{d\varepsilon_{ve}}{d\tau}$$

Так як досліджуване тісто постійно піддається навантаженню із сторони валків, то в навантаженій структурі тіста еластична деформація ε розвивається по рівнянню [1]:

$$\varepsilon_{ve} = \varepsilon_m (1 - e^{-\tau/\theta})$$

де e – основа натурального логарифму;

τ – тривалість процесу розвитку або спаду деформації ε_{ve} ;

θ – тривалість перепаду релаксації деформації рівній η_e/E_{ve} .

В міру додавання ЕКБ властивості клейковини і еластичність після деформації погіршуються – це вказує на неможливість використання таких борошняних сумішей в технології хлібобулочних виробів та бубликів.

Із графіків альвеограм (рис. 5.6), випливає, що значення показника пружності тіста (P), що характеризує стійкість і його пружність при додаванні ЕКБ, значно не змінюється. Додавання ЕКБ значно впливає на показник L – розтяжність тіста, для порівняння в контрольному зразку $L=138$ мм, а при додаванні 20% ЕКБ розтяжність становить $L = 78$ мм, що на 42,3% менше, в порівнянні з контролем.

Отже, додавання ЕКБ зменшує пружність тіста, зменшує його розтяжність та збільшується відношення P/L .

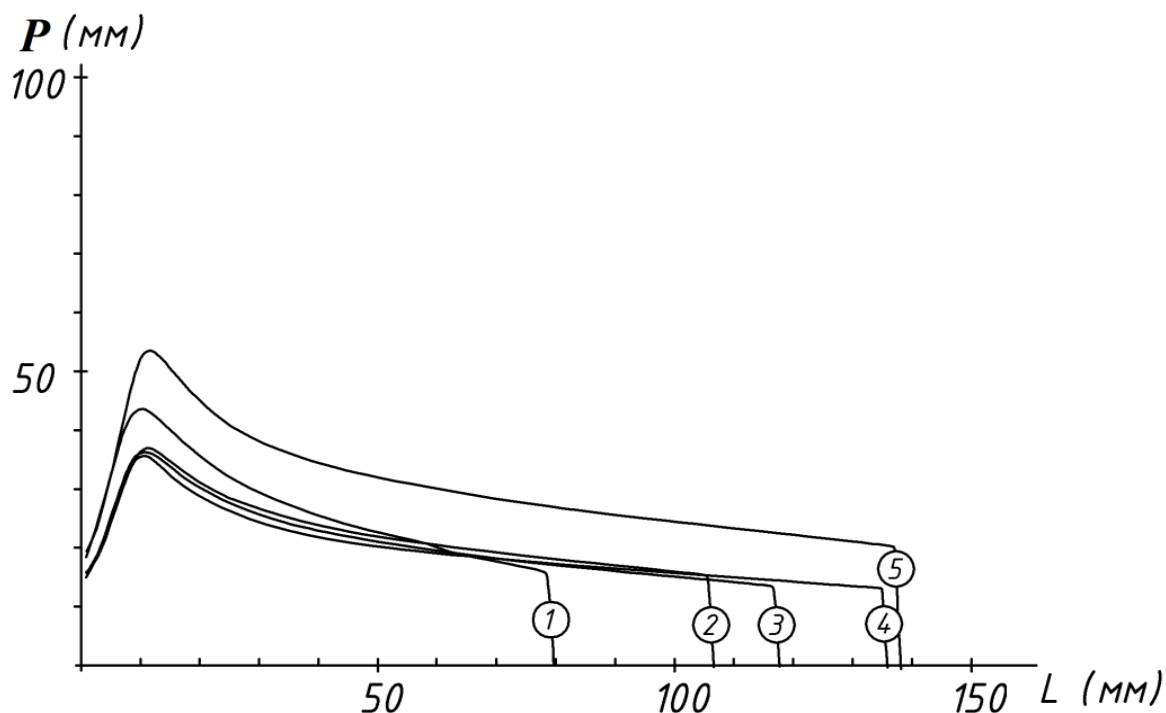


Рис. 5.6. Зміна структурно-механічних властивостей тіста із борошняних сумішей (пшеничне борошно вищого гатунку та ЕКБ) у співвідношеннях:

- 1 – ПБ:ЕКБ – 80:20%; 2 – ПБ:ЕКБ – 85:15%; 3 – ПБ:ЕКБ – 90:10%;
4 – ПБ:ЕКБ 95:5%; 5 – ЕКБ:ПБ – 0:100% – контроль

Відомо, що співвідношення P/L рівне 1,2...1,3, характерно для тіста з добре збалансованою якістю клейковини. Для контрольного зразку це співвідношення рівне $0,43 \pm 0,02$, тобто дане пшеничне борошно містить клейковину невисокої якості із слабкою пружністю і великою розтяжністю. Однак, введення ЕКБ в концентраціях 5, 10, 15% приводить до наближення показників пружності і розтяжності, що видно з рис. 5.7.

Як видно з рисунка 3.7 оптимальним є додавання ЕКБ в кількості 20%. Саме в області цієї концентрації співвідношення знаходиться в межах 0,62...0,70, що ближче до оптимальних меж (0,8...1,6) для борошна проте, непридатне для використання в дріжджовому тісті. Таким чином, борошняна суміш, що містить 20% ЕКБ, може бути рекомендована для приготування кондитерських виробів на основі напівфабрикатів, оскільки введення її приводить до зміни клейковини пшеничного борошна і виключає необхідність введення крохмалю для її ослаблення.

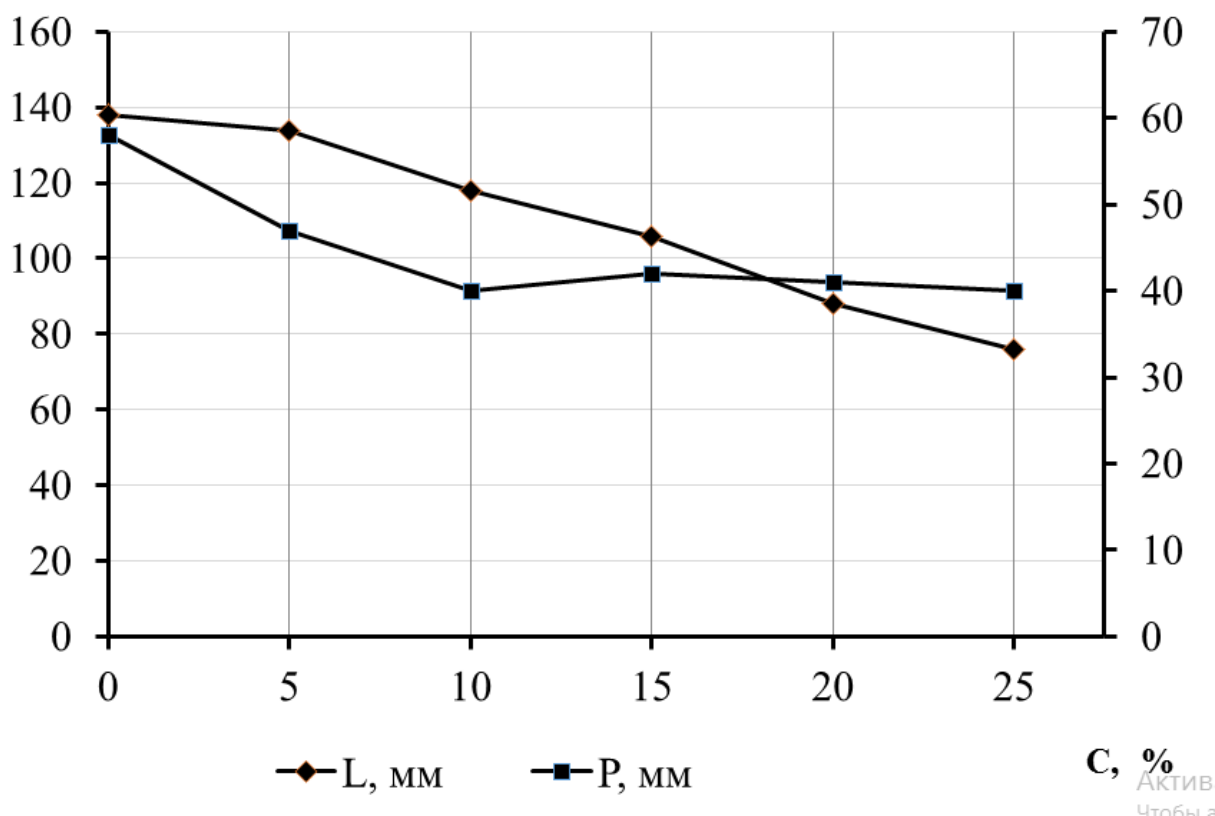


Рис. 5.7 Залежність пружності і розтяжності тіста від вмісту (С) екструдованого кукурудзяного борошна.

Проведені дослідження показали, що додавання ЕКБ в кількості 20% підвищує водопоглинальну здатність тіста на 1,5–3%, що є передумовою для підвищення виходу борошняних виробів за рахунок збільшення вологості тіста без погіршення якості виробів, та можливого подовження термінів його зберігання у результаті сповільнення процесу черствіння.

5.6. Дослідження механічних характеристик тістових напівфабрикатів при формуванні

Якість напівфабрикату, який за своєю структурою є колоїдним капілярно-пористим матеріалом, формується на всіх етапах його виробництва, в тому числі й на етапі формування тіста у заготовки. При цьому відбувається закріплення структури тіста внаслідок денатурації його білкових компонентів та клейстеризації крохмалю, а пухирці повітря, що розширюються з підвищенням тиску і температури, утворюють порожечі.

Борошняні суміші з використанням ЕКБ, володіють якісно новими властивостями, що дозволяє рекомендувати їх до використання у виробництві

бубликів з метою їх випуску високої якості, розширення асортименту, стабілізації технологічного процесу і зниження собівартості. Нами експериментально доведено, що наявність ЕКБ в кількості 20% в сумішах з пшеничним борошном понижує «силу» клейковини та змінює в'язкість тіста, що деформується при формуванні.

Для встановлення науково обґрунтованих рецептур та технологічних режимів виробництва бубликових напівфабрикатів з використанням ЕКБ доцільним на даному етапі є вивчення впливу ЕКБ на реологічні показники тіста та випеченого напівфабрикату. Отримані результати досліджень буде використано як основу під час розроблення рецептур та технологічних схем для виробництва бубликових напівфабрикатів з використанням ЕКБ.

5.6.1. Механічні властивості тіста з використанням екструдованого кукурудзяного борошна

На думку авторів [1, 4] та розгляду технологічних властивостей дисперсних систем (див. розділ 2) встановлено, що вони характеризуються перш за все реологічними властивостями. Вивчення структурно-механічних властивостей високомолекулярних систем дає можливість охарактеризувати їх поведінку під дією навантаження і швидкості, що впливають на модельні системи.

Одним з найважливіших показників тіста є наявність певної в'язкості. Висока структурна в'язкість визначає механічну міцність тіста, тобто створює пружний каркас, що надає системі певні фізико-хімічні властивості твердого тіла. Стабільність дисперсної системи, якою є тісто для бубликів у великій мірі зумовлена в'язкістю і стійкістю до дії навантажень.

Найбільш активно протікають колоїдні процеси. В результаті механічної дії валків проходить додаткове поглинання вільної води білками, крохмалем та пентозанами. Вони збільшуються в об'ємі, а цукри, мінеральні та водорозчинні речовини і вітаміни переходять у розчин. В утворенні напівфабрикату із пшеничного тіста першорядна роль належить білкам, які поглинають кількість води. Саме за рахунок осмотично зв'язаної вологи білкова молекула розпушується та збільшується в об'ємі.

Під час формування тіста, внаслідок механічної дії валків, набухлі і збільшені в об'ємі водонерозчинні білкові речовини (клейковинні білки) утворюють тривимірну губчасто-сітчасту неперервну структуру. Її називають клейковинним каркасом. Саме він визначає еластичні та пружні властивості тіста. До складу каркасу входять зерна крохмалю, нерозчинні пентозани,

частинки оболонки зерна. Мікроструктуру зерна наведено на рис. 5.7.

Оскільки, запропоноване введення ЕКБ до рецептурної суміші може змінити стійкість системи, нами проведено серію експериментів з вивчення залежності ефективної в'язкості різних зразків тіста з додаванням ЕКБ від швидкості та дотичної напруги зсуву.

Вплив додавання екструдованого кукурудзяного борошна на в'язкість тіста досліджували на «Реотест-2» (табл. 5.8). Діапазон швидкості зсуву Dt 0,3–25,0 с⁻¹.

Таблиця 5.8.

Ефективна в'язкість тіста після деформації формування

Зразки	Швидкість зсуву Dt, c^{-1}							
	0,89	2,08	3,86	8,02	9,60	10,40	11,65	24,19
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.Контроль 100% ПБ	31,86±0,4	13,44±0,2	6,50±0,3	4,35±0,4	3,90±0,3	4,18±0,2	4,13±0,5	4,02±0,3
2.ЕКБ:ПБ 5:95%	26,96±0,3	10,61±0,3	4,92±0,4	4,30±0,3	4,69±0,2	3,93±0,3	3,82±0,3	3,80±0,4
3.ЕКБ:ПБ 10:90%	25,98±0,5	10,40±0,4	5,37±0,3	4,43±0,2	4,39±0,4	3,88±0,3	3,71±0,2	3,57±0,5
4.ЕКБ:ПБ 15:85%	24,51±0,4	10,08±0,2	5,20±0,2	4,22±0,5	4,29±0,3	3,71±0,4	3,38±0,6	3,20±0,3
5.ЕКБ:ПБ 20:80%	24,02±0,3	9,77±0,3	5,09±0,3	3,97±0,4	3,67±0,2	3,27±0,4	3,03±0,5	2,92±0,2

Результати дослідження свідчать, що ефективна в'язкість тіста з додаванням ЕКБ зазнає певних змін. Так, в'язкість тіста для всіх зразків з вмістом ЕКБ при мінімальній швидкості зсуву 0,89 с⁻¹ менша від в'язкості контрольного зразку в середньому на 15...30%, що зумовлено вологозв'язуючою здатністю ЕКБ та пояснюється розрідженням системи тіста. На основі даних побудовано криві течії η (γ) рис. 5.9 та реологічні криві залежності напруги зсуву τ , Па, від швидкості зсуву γ с⁻¹ (рис. 5.8) для експериментальних зразків з використанням ЕКБ.

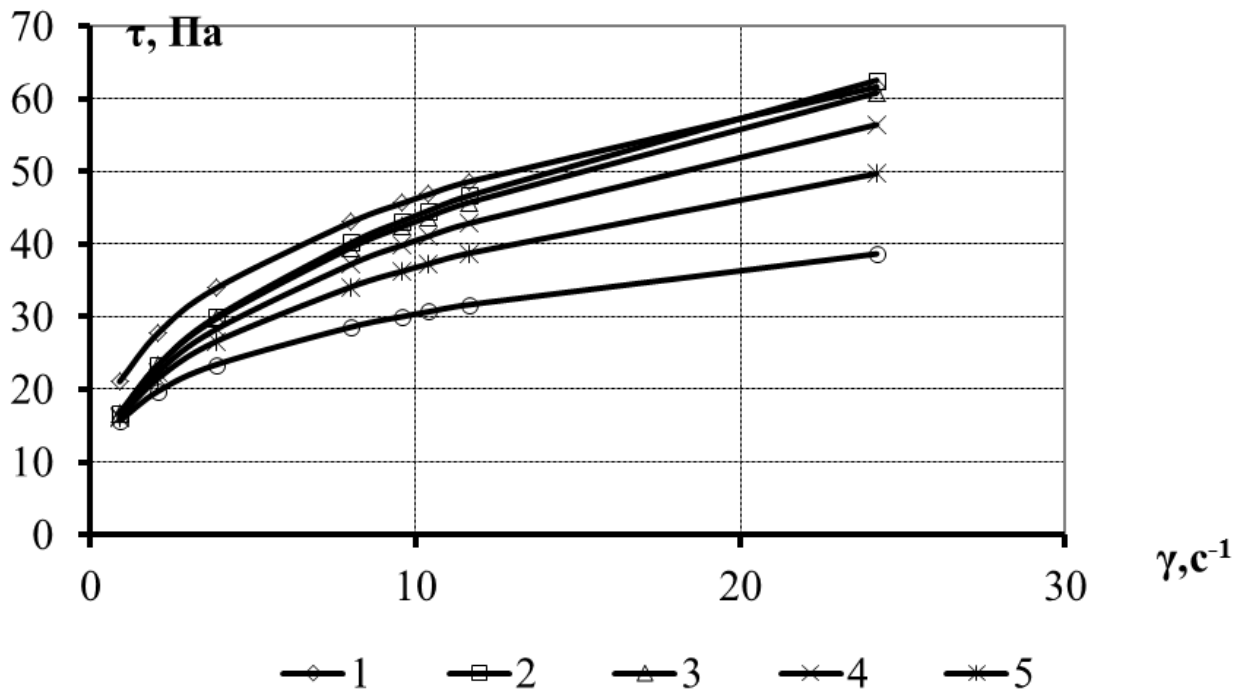


Рис. 5.8. Залежність напруги зсуву, τ Па від швидкості зсуву, γ с⁻¹ для зразків № 1: (контроль); № 2 – ПБ:ЕКБ – 95:5%; № 3 – ПБ:ЕКБ – 90:10%; № 4 – ПБ:ЕКБ – 85:15%; № 5 – ПБ:ЕКБ – 80:20%

Аналіз отриманих результатів дозволяє виділити наступні закономірності. Криві течії всіх зразків демонструють зменшення в'язкості із збільшенням швидкості зсуву. Найінтенсивніше зниження спостерігається для тіста на основі суміші з вмістом ЕКБ 20% при швидкості зсуву 2,4 с⁻¹. Подальше зниження ефективної в'язкості при збільшенні швидкості зсуву відбувається менш інтенсивно, а також у всіх зразків з'являється тенденція наближення до постійної в'язкості 2,4 Па•с до контрольного зразка. Така зміна в'язкості при збільшенні швидкості зсуву, пояснюється руйнуванням системи бубликового тіста. При подальшому підвищенні швидкості зсуву γ (12,0...25,0) с⁻¹ в'язкість всіх зразків залишається на тому ж рівні, що і при швидкості зсуву γ 11,65 с⁻¹.

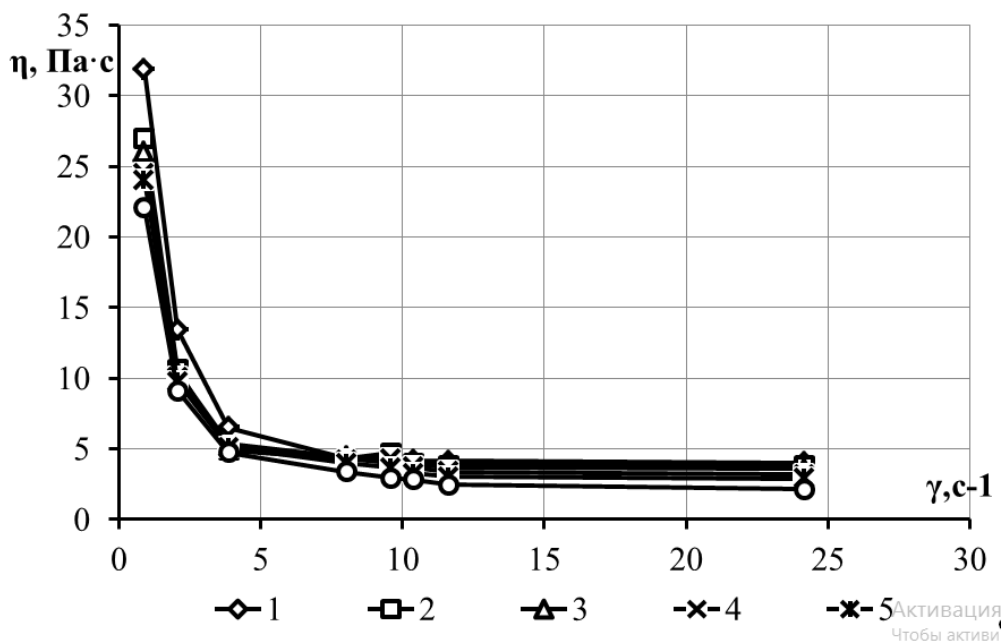


Рис. 5.9. Залежність ефективної в'язкості η , Па·с від швидкості зсуву γ , с-1 зразків № 1: (контроль); № 2 – ПБ:ЕКБ – 95:5%; № 3 – ПБ:ЕКБ – 90:10%; № 4 – ПБ:ЕКБ – 85:15%; № 5 – ПБ:ЕКБ – 80:20%

Очевидно, через вищу водопоглинальну здатність ЕКБ його додавання здійснює дестабілізуючий ефект на структурно-механічні властивості структури тіста за рахунок розрідження системи.

Таким чином, отримані результати дослідження впливу ЕКБ на реологічні показники тіста показали, що використання ЕКБ призводить до зміни ефективної в'язкості в бік її зниження у досліджуваних зразках. При цьому спостерігається залежність змін ефективної в'язкості від масової частки ЕКБ в складі борошняних сумішей. Збільшення швидкості зсуву у діапазоні γ (12,0...25,0) с-1 призводить до певної стабілізації в'язкості зразків. Ця закономірність очевидно пов'язана із властивостями кукурудзяного борошна, які воно набуває під час екструзійної обробки.

Аналізуючи вплив валків на реологічні властивості тіста, можна зробити висновки про те, що вони визначають вид і величину його деформації. Досить короткий період релаксації внутрішніх напружень (із-за низької в'язкості або значного модуля зсуву) сприяє прояву в тісті властивостей пластичності (текучості). Таке тісто незалежно від величини в'язкості швидко втрачає свої властивості, тобто пружні внутрішні напруження, що визначають об'єм, форму, опір силам гравітації [4]. Відповідно таке тісто досить швидко деформується. Так як тісто постійно одержує деформації, то це сприяє прояву у ньому пружно-еластичних властивостей. Крім цього, на механічні властивості тіста

впливають цукроутворюючі властивості борошна, його газоутворюючі властивості і газопроникливість. Вони визначають величину енергії і внутрішні зусилля необхідні для розвитку деформації та напружень у формуванні об'єму напівфабриката.

Важливу роль відіграє склад тістана його прилипання до валків. Тиск відриву пшеничного тіста із борошна вищого сорту знаходиться в прямій залежності від величини стискання, вистоювання після замішування та тривалості контакту з валками формувальної машини. Відривання тіста з поверхні валків при їх аземодії в значній мірі також залежить від площі контакту, товщини шару тіста, тривалості взаємодії. Для досліджуваного тіста із суміші ЕКБ виявлено, що його максимальне значення при температурі біля 23⁰С і при меншій стисканні. Зазор між валками був в межах 2.5 мм...3.2 мм з тривалістю контакту 1.8...2с. тісто із суміші ЕКБ з 20% складом мало збільшену липкість до існуючих валків, а при використанні нових-товщина шару, тривалість контакту, температура не були в прямій залежності від даних параметрів уадгезійному характері відриву. При вологості 30...33% і тиску порядку 10³Н/м² відбувалося відривання тіста без залишку його в пазах валків.

5.7. Моделювання виробництва напівфабрикатів з використанням екструдованого кукурудзяного борошна

Дослідження технологічних властивостей борошняних сумішей із ЕКБ, проведені і описані в розділах, свідчать про доцільність використання їх у виробництві дріжджових видів тіста, що передбачають використання борошна вищого сорту із середньою клейковиною.

Виходячи з аналізу отриманих експериментальних даних (розділ 3.5) можна стверджувати, що використання ЕКБ сприяє показникам бубличного тіста та підвищує його водопоглинальну здатність. Його використання дозволить збільшити вихід готових виробів та розширення асортименту напівфабрикатів.

Проведений комплекс досліджень дозволив науково обґрунтувати технологію і рецептуру напівфабрикатів з використанням ЕКБ та запропонувати їх асортимент. Результати досліджень показали, що оптимальна кількість ЕКБ становить 20% від загального вмісту борошна. Для визначення раціонального співвідношення компонентів – вмісту цукру та маргарини, проведено повнофакторний експеримент. У межах двофакторної моделі використано методику моделювання (волого-утримуючої здатності ВУЗ),

густини, пористості та упікання від вмісту жиру, цукру та ЕКБ. Для того, щоб не ускладнювати математичну модель, проведено три двофакторних експерименти 2^3 з варіюванням вмісту маргарину (x_1 , %), цукру (x_2 , %) за фіксованих значень борошна (26%, 27%, 28%).

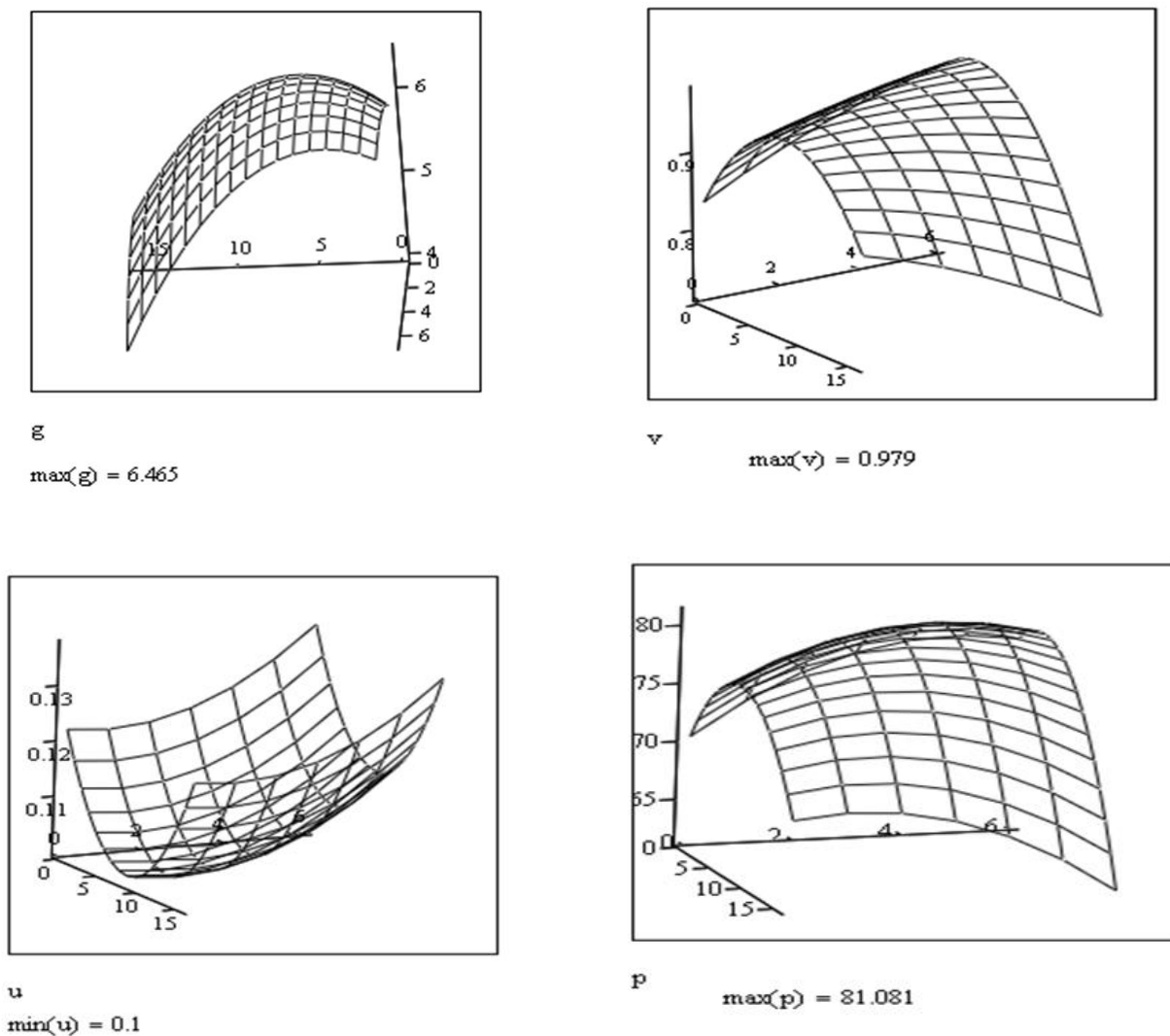


Рис. 5.10. Графік 3-вимірної залежності густини (g), вмісту вологи (v), упікання (u), пористості (p) бубликового тіста від вмісту жиру та цукру

Оператор програми MathCAD оцінки екстремуму для функції G (E , C , B) дає результат оптимальності: $\max(g) = 6,47(\text{кг/м}^3)$, $\max(v) = 98\%$, $\min(u) = 10\%$, $\max(p) = 81,1\%$.

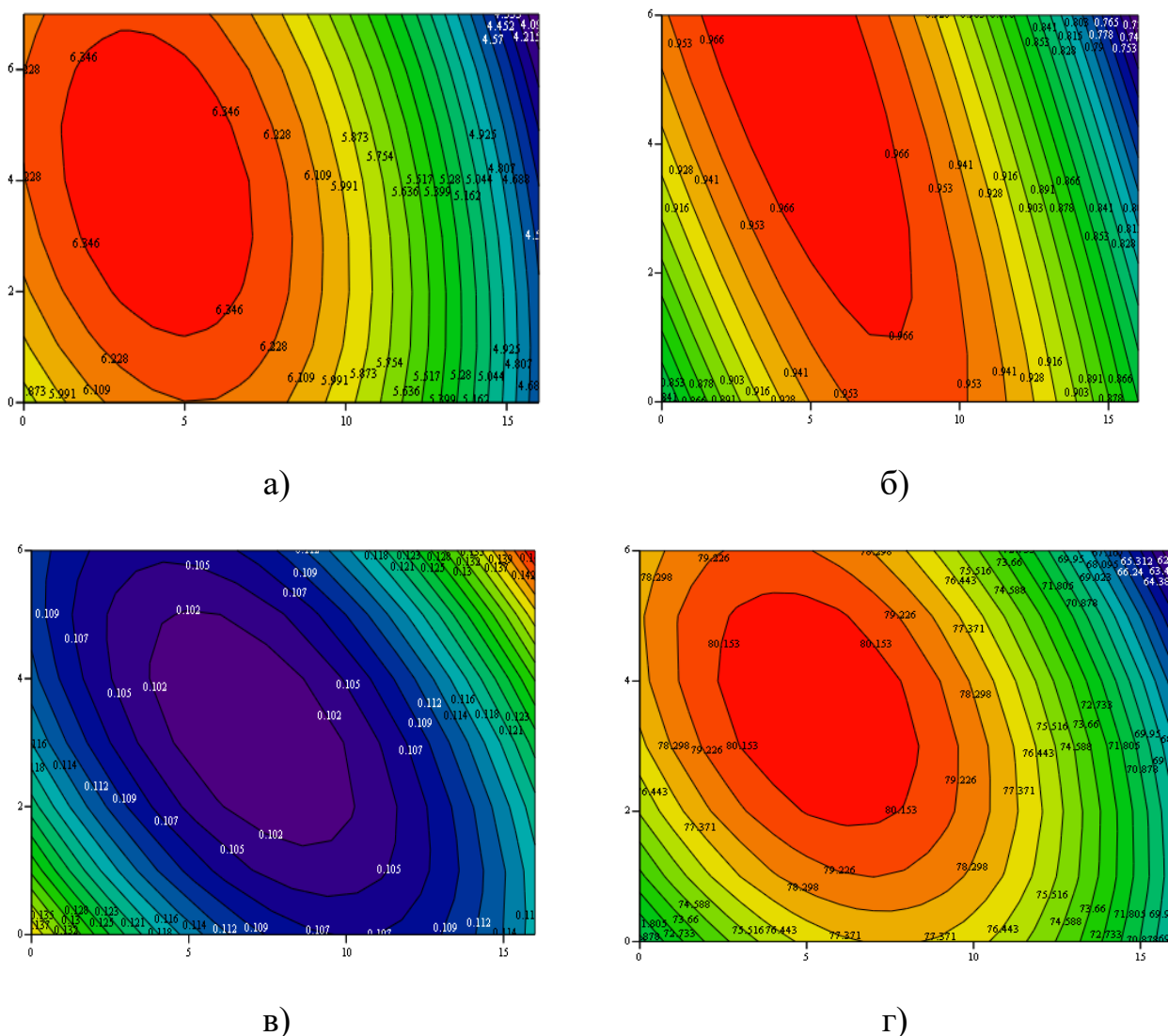


Рис. 5.11. Лінії рівня густини (а) вмісту вологи (б), упікання (в) та пористості (г) бісквітного тіста відносно параметрів вмісту яйце продуктів та цукру

Математична обробка результатів експериментальних досліджень дозволила одержати рівняння регресії та поверхні відгуку (рис. 5.10, 5.11). За одержаними рівняннями регресії визначено раціональний вміст рецептурних компонентів, який забезпечує оптимальні значення густини. Програма обчислення параметрів квадратичної моделі залежності густини від вмісту інгредієнтів надає можливість отримати поліноміальну формулу для подальших досліджень:

$$G(E,C,B)=102,25 \cdot C - 87,66 \cdot C \cdot B - 165,12 \cdot C^2 - 143,25 \cdot B^2 + 145,88 \cdot B - 37,08.$$

Аналогічно до результатів програми обчислення параметрів квадратичної моделі залежності густини від вмісту інгредієнтів із використанням програми

MathCAD-14 отримано аналітичні вирази, що представляють залежності показників упікання, пористості та вмісту вологи від параметрів вмісту жиру, цукру та борошна.

$$V(E,C,B) = 13,06 \cdot E + 0,61 \cdot C + 2,31 \cdot B - 13,11 \cdot E^2 - 1,31 \cdot C^2 - 4,97 \cdot B^2 - 2,61;$$

$$U(E,C,B) = -3,38 \cdot E - 2,88 \cdot C + 3,38 \cdot E^2 + 6,27 \cdot C^2 + 11,18;$$

$$P(E,C,B) = 625 \cdot E - 625 \cdot E^2 - 2393 \cdot C^2 + 1100,78 \cdot C - 2339,0 \cdot B^2 + 1263,06 \cdot B - 371,85;$$

Дослідження моделі дає можливість стверджувати, що оптимум густини тіста досягається для параметрів $(E, C, B) = (0,5; 0,23; 0,23)$ із високим рівнем точності – 1,4%.

Аналіз діаграм (рис 3.9) ліній рівня параметрів тіста дає усі підстави стверджувати, що знайдений оптимум відповідає значенням вмісту інгредієнтів: жир – 18%, цукор – 18%, борошно в.с. – 50% і (ЕКБ) – 14% із точністю: 0,4%, 0,14% та 0,12% відповідно. Проведені дослідження дозволили розробити рецептуру бубликового тіста.

Висновки до п'ятого розділу

1. Аналітичний огляд існуючих технологій дозволив визначити перспективи стадійрозвитку тіста із використанням ЕКБ при виробництві бубликів.

2. Проаналізовано існуючі підходи щодо удосконалення технології та доведено доцільність використання борошняних сумішей ЕКБ у технології бубликових напівфабрикатів. Такий підхід дозволить зменшити втрати маси напівфабрикату під час випікання та зберігання, стабілізувати технологічний процес, отримати широкий асортимент продукції з високими органолептичними властивостями, збільшити терміни їх зберігання.

3. Відповідно задач дослідження розроблено план аналітичних та експериментальних робіт, який спрямовано на розробку й наукове обґрунтування технології виробництва бубликів з використанням ЕКБ. Виділено взаємопов'язані етапи аналізу наукових даних за проблемою, обґрунтовано рецептурний склад та технологію процесу виробництва.

4. Проведено підбір методів дослідження, необхідних для визначення фізико-хімічних, органолептичних та мікробіологічних показників, планування експерименту та математичної обробки експериментальних даних з використанням комп'ютерних програм, що забезпечує високий рівень вірогідності результатів дослідження.

Список використаної літератури

1. Асоціація «Укркондпром». URL: <http://ukrkondprom.com.ua>.
2. Барсукова Н. В., Решетников Д. А., Красильников В.Н. Пищевая инженерия: технологии безглютеновых мучных изделий. Хранение и переработка зерна. Днепропетровск:ООО ИА «АПК-ЗЕРНО», 2011, № 4. С. 43–46.
3. Цыганова Т. Б. Шнейдер Д. В., Костылева Е. В. Формирование рецептур для производства безбелковых и безглютеновых продуктов. Хлебопродукты. 2011. № 12. С. 44–46.
4. Дробот В. І., Писарець О. П. Молочна сироватка покращує якість хліба з суміші пшеничного і кукурудзяного борошна. Хранение и переработка зерна. 2014. № 10 (187). С. 46–48.
5. Dimitrios Sabanis, Constantina Tzia Effect of Rice, Corn and Soy Flour Addition on Characteristics of Bread Produced from Different Wheat Cultivars. Food and Bioprocess Technology. 2009. Vol. 2. Issue1. P. 68–79.
6. Ковбаса В. М. Наукове обґрунтування високотемпературної екструзії природних біополімерів та розроблення раціональних технологій харчоконцентратів і хлібопродуктів поліпшеної якості: дис...д-ра техн. наук: 05.18.01. Київ, 1998. 338 с.
7. Torbica A., Hadnađev M., Darčević T. Rheological, textural and sensory properties of gluten-free bread formulations based on rice and buckwheat flour. Food Hydrocolloids. Vol. 24. Iss. 6–7. P. 626–632.
8. Лісовська Т. О., Деркач А. В., Стадник І. Я. Вивчення можливості використання екструдованого кукурудзяного борошна в технології борошняних кондитерських виробів оздоровчого призначення. Наукові праці НУХТ. К.: НУХТ, 2017. Т. 23. № 5. С. 108–115.
9. Koruz J., Witczak M., Ziobro R., Juszczyk L. The influence of flour on rheological properties of gluten-free dough and physical characteristics of the bread. European Food Research and Technology. 2015. Vol. 240. P. 1135–1143.
10. Козьмина Н. В. Биохимия хлебопеченья. М.: Пищевая промышленность, 1978. 280 с.
11. Стадник І. Я. Науково-технічні основи процесів та розробка обладнання для безлопатевого замішування тіста: автореф. дис. ...докт. техн. наук: спец. 05.18.12 «Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв». К., 2014. 40 с.

12. Остриков А. Н., Магомедов Г. О., Дерканосова Н. М. и др. Технология экструзионных продуктов: учеб. пособие. СПб.: Проспект Науки, 2007. 202 с.
13. ДСТУ 3946-2000. Продукція харчова. Основні положення Держспоживстандарт України. Київ, 2000. 6 с.
14. Арет В. А., Николаев Б. Л., Забровский Г. К., Николаев Л. К. «Реологические основы расчёта оборудования для производства жиросодержащих пищевых продуктов». С.-Пб: изд. СПбГУНиПТ, 2007. 537 с.
15. Николаев Б. А. Измерение структурно-механических свойств мучного теста. М.: Пищевая промышленность, 1976. 246 с.
16. Пат. на кор. мод. № 111503 UA, МПК А21С 3/10 (2006.01). Вузол подачі тіста формувальної машини; заявник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя № у 2016 05302; заявл. 16.05.2016; опублік. 10.11.2016, Бюл. № 21, 2016.
17. Пат. на кор. мод. № 111061 UA, МПК А21С 3/10 (2006.01). Вузол подачі тіста формувальної машини; заявник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя № у 2016 05317; заявл. 16.05.2016; опублік. 25.10.2016, Бюл. № 20, 2016.
18. Прокопенко Н. Ф., Соболев Л. Л. Определение степеней механической обработки теста. Хлебопекарная и кондитерская промышленность. 1961. № 12. С. 11–14.
19. Мерко И. Т., Прасько Моргун А. Ф. О влиянии степени повреждения крахмальных зерен муки на ее хлебопекарные свойства. Известия вузов. Пищевая технология. 1975. № 2. 76–78 с.

РОЗДІЛ 6

МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РІЗНОЇ СИРОВИНИ В ТЕХНОЛОГІЇ ОЗДОБЛЮВАЛЬНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ ОЗДОРОВЧОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

З виходом країни на новий рівень ринкових відносин змінилась асортиментна політика харчової промисловості взагалі та кондитерської зокрема. В умовах ринкової конкуренції все більше уваги приділяється рівню естетичності кондитерської продукції. Асортимент кондитерських виробів та напівфабрикатів, що виробляється в нашій країні, різноманітний, безперервно змінюється і нараховує близько 5000 найменувань. Більш жорсткі вимоги споживачів до смакових якостей кондитерських продуктів при обмеженій сировинній базі та зниженні якості вихідної сировини спонукають науковців до створення нового напрямку в кондитерській промисловості – розробки комбінованих харчових продуктів на сировинній основі певних регіонів.

Удосконалення технологічних процесів є один з основних напрямів в харчовій промисловості. Він передбачає вивчення зміни фізико-хімічних властивостей при використанні різноманітних методів впливу на природні сировинні матеріали, які використовуються для харчування людини. Широкі можливості в цьому напрямку відкриваються при створенні таких умов процесу, які забезпечують комплексний вплив на сировину. Тому основними технологічними напрямками в розробці нових видів кондитерських виробів та напівфабрикатів є вдосконалення асортименту товарів для дитячого та дієтичного харчування, збільшення кількості білка, зниження вмісту вуглеводів, і в першу чергу цукру. Для вирішення поставленої мети останнім часом широкого застосування набуло додавання різних наповнювачів до складу цукерних мас, які збагачують продукт біологічно активними речовинами.

6.1. Основи виробництва напівфабрикатів із сировини рослинного походження

Харчові продукти відчутно впливають на здоров'я людини протягом усього життя, а отже, представляють вагомий потенційний небезпеку. Дані ВООЗ свідчать [1], що понад 80% усіх захворювань дорослих і дітей в тій чи іншій

мірі пов'язані з порушенням харчування (серцево-судинні захворювання, цукровий діабет (ЦД) 2 типу, остеопороз та ін.). Харчовою цінністю кондитерських виробів [2] є і залишається наявний комплекс вуглеводів, білків, жирів, мінеральних речовин, вітамінів та іншого. Тому при дослідженні та впровадженні нових технологій кондитерських виробів та напівфабрикатів залишається вдосконалення асортименту дитячого та дієтичного харчування. Вирішення проблем за останній час ґрунтується на додаванні наповнювачів рецептурного складу до кондитерських пастових мас, при цьому продукт збагачується біологічно активними речовинами. Адже, необхідний комплекс речовин для організму людини, паста має багатофункціональне використання в кондитерському виробництві.

Сучасні оздоблювальні напівфабрикати для кондитерських виробів представлені широким асортиментом різноманітних кремів, помад, пластичних мас з шоколаду, марципану, цукру, малювальних мас, посипок, литих прикрас з карамелі та ін. Особливе місце серед оздоблювальних кондитерських напівфабрикатів займає марципанова маса суміші сирих ядер мигдалю, абрикосів, або горіхів. Внаслідок ексклюзивності органолептичних властивостей та багатофункціональності використання в різних напрямках кондитерського виробництва [3] паста має необхідний комплекс речовин для організму людини.

Враховуючи високий рівень імпортозалежності [4, 5], виробництво марципану в Україні обмежене, адже 80% мигдального ядра, спожитого в Україні, закордонного виробництва. Це зумовлює потребу пошуку нових інгредієнтів вітчизняного виробництва, які дозволять зменшити частку імпортозалежної сировини в рецептурах марципанових мас та знизити собівартість готових виробів. При цьому зберігати типовий марципановий смак, аромат і структуру продукту, а також підвищити його біологічну та харчову цінність. На основі цього удосконалення існуючих технологій марципанових паст повинно ґрунтуватися на використанні нетрадиційної рослинної сировини спрямованої на підвищення біологічної цінності, зниження енергоємності, покращення смакоароматичних та функціонально-технологічних властивостей.

Для створення нових видів харчових продуктів підвищеної біологічної цінності значний інтерес як нетрадиційні та місцеві види сировини становлять продукти рослинного походження як більш дешеві і менш трудомісткі під час виробництва. Нам відомо [6], що сировина рослинного походження розподіляється на ряд груп: фруктово-ягідну, овочеву, зернобобову, крохмалепродуктову. У першу чергу, таким вимогам відповідають зернові та зернобобові культури. Вони мають необхідні для поліпшення ознаки:

нешкідлив і для організму людини, загальнодоступні, дешеві, а головне, є природним джерелом збагачення готової продукції білками, жирами, харчовими волокнами, вітамінами, мінеральними речовинами, поліфенольними сполуками та іншими біологічноактивними речовинами. Раціональне використання рослинної сировини створення на її основі різних форм харчового білка (білкового борошна, концентратів, текстуратів, ізолятів) є перспективним напрямком вирішення проблеми зниження білкового дефіциту.

Сучасні технології кондитерської галузі дають змогу створювати вироби з різноманітністю смакових властивостей, ароматів, консистенцій, форм, що привертає увагу споживачів та сприяє збільшенню попиту. Останнім часом особлива увага звертається на виробництво зернобобових, що мають велике значення для поліпшення постачання населення продовольством. В даний час зібрано велику кількість зразків колекції зернобобових, в тому числі квасолі. Вивчення деяких біохімічних показників і в цих зразків [4, 6] має велике теоретичне і практичне значення.

Рослинний білок є найбільш важливою складовою частиною харчових і кормових ресурсів, використання яких суттєво впливає на стан здоров'я людей, їхній добробут, тривалість і рівень життя. Особливого значення це досягнуло у наші дні, коли має місце значний ріст населення нашої планети, що призводить у ряді країн до білкового голодування. У кінці ХХ сторіччя частка рослинного білка [4, 6] складала 70%, а 30% припадало на тваринний, у загальному балансі цього продукту.

Дефіцит рослинного білка залишається однією з найважливіших проблем сучасності. За останні роки вона не втратила своєї актуальності. Більшість вчених схильні вважати, що це й період має стати століттям зернобобових культур, за рахунок яких буде вирішене завдання збільшення виробництва рослинного білка для потреб тваринництва та харчування населення. В умовах сучасного сільськогосподарського виробництва поповнення білкового дефіциту за рахунок власних ресурсів стає гострою необхідністю.

На сучасному етапі однією з причин білкового дефіциту є недостатнє використання рослинних ресурсів, зокрема представників родини Fabaceae видів роду *Phaseolus vulgaris*, яка включає біля 200 видів. Проте, висока продуктивність рослин квасолі можлива лише за умов максимального їхнього забезпечення елементами живлення.

Квасоля є цінною високобілковою культурою [7], яку широко використовують в харчовій промисловості, медицині, косметичці. У зерні наявні речовини, які сприяють виведенню радіонуклідів з організму людини [8].

Значення її в народному господарстві визначається високими смаковими та харчовими якостями. Продукти з квасолі дозволяють не тільки задовольнити потреби людини в рослинному білку, але урізноманітнюють раціон харчування, тому користуються великим попитом у населення. Найважливішою в харчовому відношенні складовою частиною насіння квасолі є білки [3, 9], які беруть участь у найважливіших функціях організму і не можуть бути замінені іншими харчовими речовинами.

Квасоля володіє високою потенційною врожайністю, яка реалізується в разі дотримання агротехнічних вимог і рекомендацій. Її середня врожайність у світі близько 0,07 т/га, а за оптимальних умов – сягає 3,0–4,5 т/га [1]. Особливо в якості продуктів харчування [8, 9], квасоля користується великим попитом. Її зерно містить до 32% білка, який за поживністю наближається до білків тваринного походження. Окрім білків, зерно містить 41,0–54,6% вуглеводів, 0,4–3,6% жирів, 2,2–6,6% клітковини, вітаміни Е, В 1, В 2, В 6, С, патогенну кислоту, рибофлавін, мінеральні речовини.

Особливістю квасолі є її багатий мінеральний склад – залізо (до 8%), кальцій, фосфор, калій, натрій, магній, йод, клітковина, лимонна кислота, зольні речовини. Квасоля, як підтверджують наведені дані, є таким харчовим продуктом, в якому містяться майже всі речовини, необхідні для нормального харчування людини, що ставить її в число дієтичних продуктів.

У сучасному суспільстві індустріалізація і глобалізація виробництва харчових продуктів, а також реклама в засобах масової інформації все відчутніше впливають на якість харчування, тому важливо не послаблювати роль наукових розробок і напрацювання спеціалістів. Квасоля здавна була традиційною культурою в Україні, але вона не знайшла широкого розповсюдження. Тому подальша розробка наукових основ технології її використання в кондитерській промисловості є важливою науковою проблемою.

6.2. Аналітичний аналіз досліджень по використанню рослинної сировини в приготуванні бобових паст

Ураховуючи сучасні потреби ринку, бобові культури відіграють все більшу роль у процесі розроблення продуктів харчування. Деякі з них, наприклад, соя [4, 7] вже давно масово застосовується у виробництві продуктів із комбінованим м'ясо-рослинним складом як структурна та білкова добавка. Подібні дослідження проводяться і для інших бобових культур – квасолі, гороху, нуту. Первинна оцінка можливості використання пасти з гороху та квасолі за

органолептичними показниками була проведена в роботах [8]. Зразки з додаванням квасолі мали високі смакові властивості, що є важливою складовою для напівфабрикатів.

У кондитерському виробництві широко застосовуються різні ботанічні сорти білої та червоної квасолі, особливо в Японії, Китаї та Кореї. Досить чітко і своїх працях [10, 11] розкрито про солодку бобову пасту, виготовлену уварюванням цукру з квасолею. Її широко використовують для склеювання тортів, тістечок, печива, як прошарок для десертів і борошняних кондитерських виробів, для виготовлення цукерок, батончиків та як пластичну масу для виготовлення квітів і моделювання фігурних декоративних елементів. Дані розроблені технології дає змогу отримати кондитерську бобову пасту високої біологічної та харчової цінності, проте вона має досить низькі органолептичні характеристики через притаманний специфічний бобовий смак та аромат.

Водночас для вирішення відповідних технологічних завдань хлібопекарного і кондитерського виробництва розробляються певні види спеціалізованих жирових продуктів, що дозволяють оптимізувати технологію виробництва продукції підвищеної харчової цінності і стійкості у зберіганні. З метою забезпечення відповідної функціональної направленості ведуться пошуки щодо включення в рецептуру цінних додаткових інгредієнтів, зокрема зі збалансованим жирнокислотним складом, пониженим вмістом насичених жирних кислот, наявністю есенціальних речовин ліпідної природи, з мінімальним вмістом холестерину і трансізомерів жирних кислот [4]. Наукове спрямування технологічних процесів може в певній мірі регулювати харчову цінність.

В дослідженнях [7] розкрито вибір параметрів процесу згідно характеру змін структури і властивостей рецептурних компонентів у цілому. Ми бачимо прямий зв'язок значення харчування в житті людини за рахунок удосконалення рецептур, технологічних параметрів виробництва. Відомо [3], що бобові пасти отримують шляхом уварювання цукру та квасолі у співвідношенні 1:1. В результаті такої взаємодії утворюється складна гомогенна система, що відноситься до коагуляційних структур. Процес структуроутворення визначається в першу чергу складом і будовою клітин бобових та фізичним станом полімерів.

Аналіз порівняльної характеристики хімічного складу окремих бобових культур проведений автором [12]. За кількістю незамінних амінокислот у перерахунку на 100 г білка квасоля переважає інші бобові культури, крім нута (рис. 6.1.).

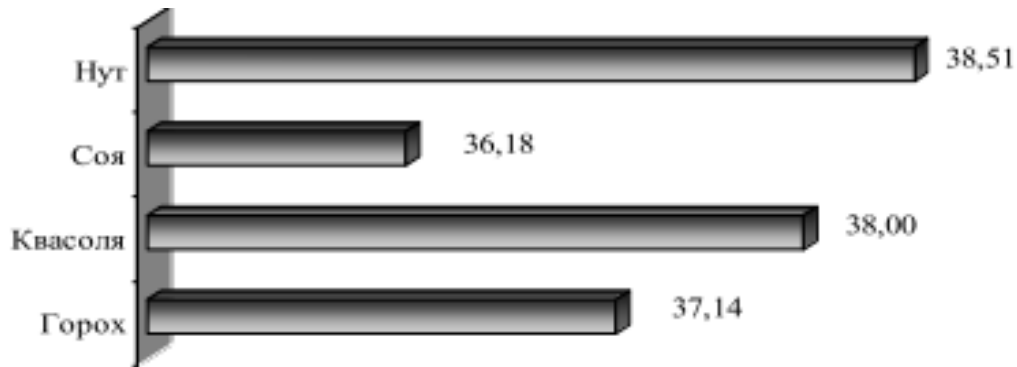


Рис. 6.1. Вміст загальної кількості незамінних амінокислот бобових культур, г/100г білка

Саме тому останнім часом підвищується інтерес науковців до бобових культур як до сировини, альтернативної для виробництва паст. На початковій стадії взаємодії бобів з водою проходить набухання, що супроводжується значним збільшенням об'єму і маси. В процесі стадії варіння, очищені від насінної оболонки боби квасолі зазнають складних фізико-хімічних змін. Це призводить до розм'якшення утворюючої суміші. Температурні параметри мають вплив на проходження процесу. Так, підвищення температури прискорює просування вологи всередину сім'ядолі бобів. Відповідно інтенсивніше протікає процес набухання білкових речовин і вуглеводів клітинних стінок та прискорюється клейстеризація крохмалю, що вже почалась.

Білки в процесі варіння денатурують, а поглинена ними волога виділяється і поглинається клейстеризуючим крохмалем. В процесі варіння під дією проникаючої вологи і температури відбувається деструкція клітинних стінок сім'ядоль бобів. Найбільшій деструкції [3] піддаються пектинові речовини, в середньому на 40%, у меншій мірі геміцелюлоза та структурний білок клітинних стінок екстензій. Під тиском оклейстерованого крохмалю, відбувається розрив клітинних стінок. Це призводить до повного порушення цілісності форми сім'я доль.

Формування структури бобових паст [7] зумовлено розвитком двох протилежно направлених процесів. Перший полягає у ферментативній руйнації залишкової клітинної структури, а другий – самовільного агрегування білкових часток в просторовий каркас, внаслідок поступового обезводнювання системи. Цукор в даній технології відіграє роль пластифікатора. Утворюючи зони зв'язування, цукор зменшує швидкість клейстеризації крохмалю, при цьому, знижуючи пік в'язкості.

Використання молочної сироватки сухої демінералізованої (МССД) досить детально розглянуто нами в роботі [13]. Тому за рахунок високої вологозв'язуючої і вологутримувальної здатності вона в технологіях бобових паст сприятиме утворенню більш міцної структури її білкової компоненти, що зумовлено виникненням і розвитком просторового каркасу. В результаті теплової денатурації і коагуляції білків, розчинених в безперервній фазі дисперсійного середовища, за рахунок виникнення більш міцних водневих зв'язків, вона надає каркасу статичну міцність на зсув. Це дає змогу надати певних структурно-механічних властивостей бобовим пастам.

За результатами попередніх досліджень встановлено [4, 14], що МССД у концентрації 10...30% покращує реологічних характеристики бобових паст. Підвищення показників формувальної здатності надає пастам певні функціонально-технологічні властивості. Визначені концентрації сприяють «маскуванню» бобового смаку та аромату. Крім цього створюється гармонійна смако-ароматична композиція з покращеними органолептичними характеристиками бобових паст. Таку пасту дозволяють використовувати в кондитерському виробництві, як оздоблювальні напівфабрикати.

Проте підвищення концентрації МССД в технологіях бобових паст сприяє посиленню адгезійно-когезійної міцності, що ускладнює роботу з пастами. Бобова паста в порівнянні з цукровою характеризується меншою міцністю тому з метою зниження адгезійно-когезійної міцності доцільно розглянути жировий компонент, що при температурі 21°C має тверду консистенцію. Це обумовлено певними кристалізаційними властивостями, які визначаються складом жирних кислот. Як відомо [4, 14], жири в яких переважають насичені гліцериди жирних кислот мають більш високу твердість. За результатами фізико-хімічних властивостей оптимальні характеристики встановлені у кокосового масла. За хімічним складом кокосове масло відзначається високим вмістом насичених жирних кислот, зокрема лауринової та міристинових, а також невеликою кількістю летких кислот, а саме каприлової і капронової. Кокосове масло має високу стійкість до окислення, це пояснюється тим, що 90% жирних кислот є насиченими. Отже вибір кокосового масла в рецептурному складі бобових паст з МССД пояснюється прийнятними фізико-хімічними та органолептичними характеристиками, що сприятиме покращенню функціонально-технологічних властивостей кондитерських паст. Від структурно-механічних властивостей бобових паст залежать консистенція і смакові якості виробу. Тому при виробництві виробів необхідно підібрати оптимальний за рецептурою склад інгредієнтів.

Грунтуючись частковими проведеними дослідженнями різних авторів та наших, прийнято рішення розробити технологію модельних композицій оздоблювальних напівфабрикатів, зокрема кондитерських бобових паст з МССД та додатковими рецептурними компонентами. Результати дослідження по оптимізації рецептурного складу оздоблювальних напівфабрикатів дозволять розробити дану технологію кондитерських паст багатofункціонального призначення з бажаними (заданими) органолептичними та структурно-механічними властивостями.

Нами запропоновано 3 основних напрями технологічного використання розроблених кондитерських паст, в основі яких лежать структурні характеристики консистенції. До першого – кондитерські пасти, що використовуються для покриття кондитерських виробів та в якості прошарку для них (ПКВ). Основним показником консистенції є розтяжність.

До другого – кондитерські пасти, що використовуються для виготовлення квітів, як декоративного елемента для борошняних кондитерських виробів (ВЦК). Основним показником консистенції є рівноцінне співвідношення розтяжності та формувальної здатності.

До третього – кондитерські пасти, що використовуються для моделювання фігурних виробів, як декоративного елемента для борошняних кондитерських виробів (МФВ). Основним показником консистенції є формувальна здатність.

6.3. Аналітичний аналіз досліджень по використанню рослинної сировини в приготуванні марципанових паст

Більша частина кондитерських виробів складається з цукру або іншої солодкої речовини (меду, ксиліту, сорбіту), а також патоки, різних фруктів і ягід, молока, вершкового масла, какао-бобів, ядер горіхів, борошна та інших компонентів. В основному це солодкі продукти, що відрізняються приємним смаком і ароматом, гарним зовнішнім виглядом, високою харчовою цінністю, калорійністю і хорошою засвоюваністю.

В роботі [15] відзначено, що вибір параметрів процесу передбачає проведення комплексних досліджень, які дозволяють виявити характер змін структури і властивостей як окремих компонентів сировини, так і сировинного матеріалу в цілому. Тому участь науковців в реалізації технологій полягає в поглибленні розуміння значення харчування в житті людини з урахуванням національних традицій, перетворень окремих компонентів їжі у структурі тіла,

їх вплив на діяльність органів і систем організму. Збереженість цінних харчових речовин та БАР, формування звичних споживчих характеристик, високої біозасвоюваності та безпечності продукції ґрунтується на розробці технологій виробів з необхідними фізіологічними властивостями за рахунок удосконалення рецептур, методів та режимів обробки сировини, технологічних параметрів виробництва.

Розроблені технології марципанових паст [16, 17, 18] авторами спрямовані на пошук і дослідження фізіологічних та технологічних властивостей нетрадиційної сировини, яка за вмістом біологічно активних речовин (БАР) може бути віднесена до так званих функціональних інгредієнтів, вивчення їх впливу на хід приготування та формування якості продукції. В основному до складу рецептури включали грецький горіх, фундук, кеш'ю, пекан, арахіс, каштан, кісточки вишні, абрикоса та насіння гарбуза. Заміна мигдалевого горіха на кісточки персика чи абрикоса [19], супроводжувалась назвою виготовленої пасти персипан. В роботах [19, 11, 16] відзначено, що оптимальну за якістю марципанову масу можна отримати із солодкого мигдалевого горіху із додаванням 1–2% гіркого. Його обмеженість ґрунтується внаслідок небезпеки утворення синильної кислоти з амідгаліну.

В роботах [17] відзначено шляхи посилення смакових та ароматичних показників марципанових паст. До їх рецептурного складу можливо включати різноманітну нетрадиційну сировину, таку як шрот кави, порошок із цикорію, насіння бундука. Такий підхід надає марципановим пастамкавового запаху та присмаку гарячого шоколаду. Одночасно в інших роботах відзначено [17], що використання порошків з насіння груш та амаранту не лише підсилює смакові та ароматичні якості марципанових паст, а й поліпшує їх реологічні характеристики внаслідок високого вмісту олій. Це створює умови підвищенню в'язкості та адгезійної напруги, що покращує формування даних кондитерських мас.

При зниженні калорійності та глікемічності оздоблювальних напівфабрикатів при їх виробництві використовують різні за технологічними властивостями, походженням, складом, калорійністю та солодкістю цукрозамінники і підсолоджувачі. Відомі технології марципанових паст із зниженим вмістом цукру [18] представлені модельними композиціями ацельсульфатом натрію або калію, аспартамом. Застосування синтетичних підсолоджувачів вказує на недолік таких композицій. В дослідженнях авторів [20, 21, 22] підтверджується їх негативний вплив на здоров'я людини.

Використання природних підсолоджувачів у технології марципанових паст, а саме: сиропу агави, еритролу, стевіозиду, палатінози дозволяють в значній мірі зменшити високу калорійність [23]. Відомі технології марципанових мас [24, 25] в яких як наповнювачі використовують різноманітні види лляного, ячмінного, гречаного, кукурудзяного, сочевичного, рисового, горохового борошна, що збільшують внутрішні сили зчеплення компонентів марципанових мас. Такі наповнювачі краще зв'язують вологу і сприяють утворенню більш однорідної і пластичної структури суміші в процесі формування. Проте, незважаючи на позитивне відношення, дані композиції знижують органолептичні показники із-за присутнього різкого злакового смаку та аромату. Особливої обережності, як об'єкти збагачення, потребують продукти дитячого харчування, що входять в раціон дітей. Їх організми більшою мірою чутливі до нетрадиційних інгредієнтів, оскільки метаболічні системи дітей сформовані ще недостатньо і не здатні протистояти підвищеним навантаженням, адекватно реагувати на них.

В якості функціональної добавки в технологіях марципанових паст використовують сушені ягоди аронії чорноплідної та порошок з листя мушмули. Цедозволяє не лише збільшити харчову і біологічну цінність, але й досягти максимально можливого профілактичного ефекту при відносно незначному вмісті в складі марципанових паст. Як антиоксидантний засіб використовують препарат «Циклорар». Дана біологічно активна речовина, що покращує харчову цінність марципанових мас та поліпшує їх формувальні властивості.

До основних недоліків марципанових паст із зазначеними добавками є знижені сенсорні характеристики. Використання добавок для збагачення нутрієнтного складу має значний вплив на зміни кольору та смаку даної продукції. В результаті виникають проблеми при тонуванні марципанової пасти та отриманні відповідної кольорової гами. Це робить даний вид оздоблювального напівфабрикату непридатним для покриття кондитерських виробів та моделювання фігурних оздоблювальних напівфабрикатів. Вихідна сировина для виробництва марципанових паст в силу біологічних, фізичних і механічних факторів змінює свої властивості і набуває характерних для даного виду паст. Процес виробництва паст можна розглядати як сукупність процесів зміни реологічних характеристик утвореного напівфабрикату згідно рецептурипід дією біологічних, фізичних і механічних чинників. З іншого боку зміна реологічних характеристик впливає на вибір конструкції і режими роботи обладнання. Тому комплекс реологічних (структурно-механічних)

властивостей марципанових паст є найважливішими, що передбачають їх стан в найрізноманітніших технологічних процесах та характеризують агрегатний стан, дисперсність, будову, структуру і вид взаємодії.

Встановлено [13], що методи і засоби визначення реологічних характеристик при різних видах деформації впливають на якість продукції. На наш погляд в роботах [4] наведено деякі приклади розрахунків технологічних процесів і обладнання, що спрямовано на дослідження фізико-механічних властивостей середовища. Такий підхід дозволяє удосконалити та інтенсифікувати технологічний процес, розробити науково обґрунтовані методи розрахунку технології формування марципанових паст.

Розроблені технології марципанових та пралінових мас [25, 26] в рецептурний склад яких включали сухе молоко, на нашу думку дозволило спрямовано покращити споживчі властивості та зниження собівартості продукції. Відомо [27] що, МССД використовують при виготовленні кондитерських виробів як заміник згущеного або сухого молока при виробництві вершкової карамелі, ірису, помадки, глазури, шоколаду.

В результаті аналізу літературних і патентних джерел виявлено широке застосування гліцерину в рецептурному складі пастоподібних оздоблювальних напівфабрикатів. Гліцерин [28] в технологіях цукрових паст використовується для зменшення липкості (адгезії) харчової системи, він надає м'якості пастам, покращує формувальні властивості, робить їх більш піддатливими в процесі виготовлення оздоблювальних напівфабрикатів. Це визначає актуальність досліджень щодо доцільності застосування гліцерину у технологіях марципанових паст з МССД.

Створення нової технології марципанових паст з МССД, доцільність використання гліцерину у їх складі потребує глибоких досліджень реологічних і сенсорних характеристик готових виробів для обґрунтування раціональних технологічних процесів, які у значному ступені обумовлюють споживчі та функціональні властивості марципанових паст. Актуальність пошуку нових рецептурних інгредієнтів для марципанових мас у частковій заміні мигдального борошна, використання яких може одночасно вирішити ряд технологічних завдань щодо забезпечення заданих органолептичних і реологічних властивостей, достатньо висока.

При розрахунку рецептури основні труднощі виникають із-за нестійкості переміщення пасти, а відповідно і зсувних деформацій, впливу якісних показників. Одночасно, удосконалення технологічного процесу

вимагає встановити взаємозв'язок між характеристиками компонентів, що впливають на марципанові пасти при формуванні виробів.

Тому основним підходом на виборі рецептури марципанових паст є встановлення реологічних зв'язків, що найбільш реальні для рішення задачі при формуванні напівфабрикатів та виробів. Відповідно дослідження розроблених марципанових паст потребує глибокі знання всіх тонкощів процесу, його математичний опис.

6.4. Матеріали та методи дослідження

Матеріали. Для того, щоб оцінити можливість використання пасти з квасолі як компонента січених напівфабрикатів, нами була проведена робота занапрямками:

- дослідження структурно-механічних властивостей квасолевої пасти;
- органолептичні характеристики модельних композицій.

З метою визначення оптимальної концентрації пасти з квасолі води (Гурова, 2001) на структурно-механічні властивості бобових паст було вивчено такі показники як пружньо-еластичні і пластично-в'язкі властивості та напруження зсуву. Паста з бобових готувалася по розробленій технології. Для оцінки можливості застосування пасти з квасолі білої продовольчої сорту «Мавка» та визначення оптимальної кількості добавки МССД проведено дослідження функціонально-технологічних властивостей пасти, які зводилися до оцінки поведінки пасти в багатокомпонентній системі. Розроблена технологія приготування бобової пасти подана в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

Технологічна система виготовлення бобових паст

Підсистема	Назва підсистеми	Завдання підсистеми	Технологічні операції і параметри
1	2	3	4
А	Механічна кулінарна обробка	Підготовка рецептурних компонентів	Квасоллю перебирають і очищають від сторонніх домішок, заливають водою ($t=15^{\circ}\text{C}$) у співвідношенні 1:2 ($\tau = 2,88 \cdot 10^4 \text{c}$), після чого очищують від насінної оболонки. МССД розчиняють у воді ($t=20-21^{\circ}\text{C}$) та проціджують, гідромодуль становить 1:2.

Закінчення таблиці 6.1

В	Теплова обробка	Формування структурно-механічних властивостей	Телова обробка здійснюється у кілька етапів: <i>I етап</i> – отримання пюре з квасолі: підготовлену квасоллю варять незливним способом до готовності ($\tau = 3,6 \cdot 10^4$ с, $t=80-85^\circ\text{C}$) та перетирають отримуючи пюре однорідної консистенції. <i>II етап</i> – процес пластифікації паст: в отримане пюре додають цукор та варять ($\tau = 3,6 \cdot 10^4$ с, $t=60-65^\circ\text{C}$). Цукор зменшуючи швидкість клестеризації крохмалю, знижує пік вязкості та надає пластичності пастам. <i>III етап</i> – введення МССД: підготовлену МССД вводять в бобову пасту та доводять до кипіння.
С	Охолодження	Отримання однорідної пластичної маси	Отриману пасту охолоджують до $t = 20-25^\circ\text{C}$ та перемішують з кокосовим маслом до отримання однорідної пластичної маси.
Д	Вистоювання	Отримання готового продукту	Вистоювання бобових паст протягом ($\tau=8,64 \cdot 10^4$ с, $t=1-3^\circ\text{C}$), що забезпечує розвиток структурно-просторового каркасу та надає пастам певних функціонально-технологічних властивостей.

Вміст амінокислот білка в бобових пастах з МССД з квасолібілої продовольчої сорту «Мавка», вирощеної в Україні, подано в таблиці 6.2.

Таблиця 6. 2

**Вміст амінокислот білка бобових паст з МССД
(на 100 г вмісту сухих речовин), $p \leq 0,05$**

Незамінна амінокислота	Контроль	ПКВ	ВЦК	МФВ
Лізин	1130±0.3	1040±0.4	826±0.3	890±0.6
Треонін	470±0.6	480±0.3	500±0.4	530±0.4
Валін	700±0.3	660±0.6	650±0.5	630±0.6
Метіонін+Цистин	210±0.1	200±0.1	180±0.1	190±0.3
Лейцин	1260±0.3	1150±0.3	1050±0.4	950±0.3
Ізолейцин	620±0.5	570±0.5	540±0.5	490±0.5
Тирозин+Фенілаланін	710±0.6	650±0.3	610±0.4	560±0.5
Триптофан	130±0.1	110±0.1	120±0.2	110±0.2

Методи досліджень реологічних характеристик модельних композицій

Пружно-еластичні і пластично-в'язкі властивості досліджували на плоскопаралельному еластопластомері Толстого [13], які засновані на визначенні деформації зсуву, віднесеного до товщини зразка.

Під час дослідження реологічних характеристик дослідних зразків, підбирали фіксоване навантаження, що становило 65 г. Крім цього забезпечували однакову температуру (+6°C) та висоту зразків (7 мм).

Для визначення реологічних показників побудовано залежність відносної деформації від часу дії напруги (рис. 6.2). На ній виділяли наступні ділянки:

γ_0, ϵ_0 (ділянка OA) – пружна умовно-миттєва деформація, що миттєво (за дуже короткий проміжок часу) виникає під дією прикладеної напруги та миттєво зникає після її зняття;

γ_m, ϵ_m (ділянка OC) – максимально досягнута деформація під дією прикладеної напруги;

$\gamma_{zv}, \epsilon_{zv}$ (ділянка OB1) – високоеластична деформація – повністю оборотна відносна деформація:

$\gamma_{zv} = \gamma_0 + \gamma_{ve}$ ($\epsilon_{zv} = \epsilon_0 + \epsilon_{ve}$); ϵ_{ve} (ділянка AB1) – високоеластична деформація – відносна деформація, що поступово зникає після зняття напруги:

$$\gamma_{ve} = \gamma_{zv} - \gamma_0 (\epsilon_{ve} = \epsilon_{zv} - \epsilon_0);$$

$\gamma_{zal}, \epsilon_{zal}$ (ділянка EO1) – залишкова (пластична) деформація, яка не

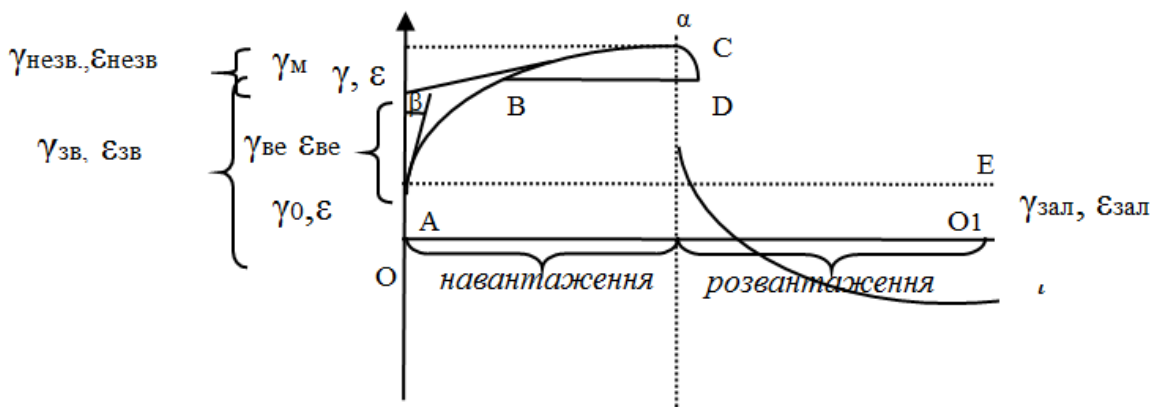


Рис. 6.2. Крива плинності дослідного зразка під дією прикладеної напруги зсуву (за навантаження та розвантажування)

зникає після зняття прикладеної напруги протягом нескінченно тривалого часу:

$$\gamma_{zal} = \gamma_{pl} (\epsilon_{zal} = \epsilon_{pl}).$$

Відокремлення загальної деформації на зворотну і незворотну здійснювали спрощеним методом екстраполяції лінійної ділянки деформації до перетину з віссю ординат $\gamma = f(t)$ (запропонованим Ребіндером). Припускається, що швидкість наростання незворотної деформації стала і не залежить від величини еластичної деформації. Якщо екстраполювати лінійну ділянку до нуля і перенести її в початок координат, то отримують швидкість наростання незворотної деформації.

Відносну деформацію визначали за формулою:

$$\gamma = k x n / d,$$

де k – ціна поділки мікроскопа, м;

n – число поділок у шкалі мікроскопа;

d – товщина зразка, м.

Коефіцієнт відношення зворотної деформації до загальної визначали за формулою:

$$K_{\gamma} = \gamma_{zv} / \gamma_m,$$

де γ_{zv} – величина зворотної деформації;

γ_m – величина максимальної деформації.

Напруження зсуву визначали за формулою:

$$\tau = m x g / S,$$

де τ – напруження зсуву, Па; m – маса вантажу, кг;

g – прискорення вільного падіння (9,81 м/с²); S – площа пластинки, м².

Піддатливість, що характеризує здатність досліджуваних зразків до деформації під дію прикладеного напруження, визначали за формулою:

$$I = \gamma_m / \tau,$$

де I – піддатливість системи, Па⁻¹;

γ_m – відносна максимальна деформація.

Модуль миттєвої пружності, що характеризує здатність досліджуваних зразків чинити опір пропорційно його деформації визначали за формулою:

$$G_{np} = \tau / \gamma_0,$$

де G_{np} – модуль миттєвої пружності, Па;

γ_0 – відносна умовно-миттєва деформація.

Модуль еластичності, що характеризує здатність до зниження деформації досліджуваних зразків з часом, після зняття напруги, визначали за формулою:

$$G_{el} = \tau / \gamma_{ve},$$

де G_{el} – модуль еластичності, Па;

γ_{ve} – відносна високоеластична деформація.

Пластичну в'язкість, що характеризує властивість структурованого стану текти без руйнування, під дію постійного напруження, визначали за формулою:

$$\dot{\eta}^*0 = \tau / tg\alpha,$$

де $\dot{\eta}^*0$ – пластична в'язкість, Па·с;

$tg\alpha$ – кут нахилу кінцевої лінійної ділянки кривої до осі абсцис.

В'язкість пружної післядії визначали за формулою:

$$\dot{\eta}_{np} = \tau / tg\beta,$$

де $\dot{\eta}_{np}$ – в'язкість пружної післядії, Па·с;

$tg\beta$ – кут нахилу початкової лінійної ділянки кривої до осі абсцис.

Дослідження адгезійно-когезійної міцності здійснювали на динамометрі MIG1.3 методом нормального відриву. Максимальне значення сили, поділене на площу контакту адгезива із субстратом, що дорівнює адгезії дослідного зразка, визначали за формулою:

$$\omega_a = - \frac{4(F_{ad} - P_{\text{доо}})}{\pi d^2}$$

де $F_{ад}$ – пікове значення сили при відриві диску, мН;

d – діаметр диску (20,8 мм);

Дослідження органолептичних характеристик модельних композицій

Органолептичні характеристики модельних композицій оздоблювальних напівфабрикатів з МССД визначали за розробленими шкалами органолептичних дескрипторів.

Дослідження модельних композицій оздоблювальних напівфабрикатів здійснено за розробленими відповідно до основних рецептурних компонентів органолептичними шкалами, що враховують показники зовнішнього вигляду, смаку, запаху, консистенції, формувальної здатності та відповідно до розподілення коефіцієнтів вагомості визначають напрями технологічного використання кондитерських паст. Показники зовнішнього вигляду характеризуються дескрипторами кольору, що дозволяють забезпечити прийнятну кольорову гаму для оздоблювальних напівфабрикатів, смаку та запаху – високу компонентну сумісність. Показники консистенції характеризуються 4 розробленими дескрипторами: 1 – міцність та щільність, 2 – м'якість, 3 – розтяжність, 4 – липкість, що мають різні коефіцієнти вагомості, в залежності від напрямку технологічного використання кондитерських паст. Для ПКВ співвідношення коефіцієнтів вагомості за показником консистенції становить 0.1:0.1:0.7:0.1, для ВЦК – 0.2:0.2:0.3:0.3, для МФВ – 0.3:0.2:0.2:0.3. Здатність до формування та ступінь виявлення даного показника визначає технологічність кондитерських паст. Коефіцієнт вагомості даного показника у співвідношенні до коефіцієнта вагомості консистенції і визначає напрямок технологічного використання кондитерських паст, що становить для ПКВ 0.4:0.2, ВЦК – 0.3:0.3, МФВ – 0.2:0.4.

Коефіцієнти вагомості визначали експертним методом за умов:

$$\sum_{i=1}^n m_{ij} = 1$$

де m_{ij} – коефіцієнт вагомості i -го показника j -ої групи ($m_i > 0$);

n – число показників якості продукції.

Коефіцієнт вагомості m_{ij} визначали за формулою:

$$m_{ij} = \frac{m_{ijcp}}{\sum_{i=1}^n m_{ijcp}}$$

де m_{ijcp} – середнє арифметичне значення оцінок експертів i -го показника якості j -ої групи.

Середнє значення m_{ijcp} визначали за формулою:

$$m_{ijcp} = \frac{1}{N} \sum_{z=1}^N m_{ijz}, \quad (z=1, 2, 3 \dots N)$$

де N – кількість експертів;

m_{ijz} – оцінка i -го показника якості j -ої групи, даного z -м експертом ($z = 1, 2, 3 \dots N$).

Таблиця 6.3

Балова шкала органолептичної оцінки якості модельних композицій бобових паст з МССД

Комплексні показники	Коефіцієнт вагомості			Одиничні показники	Коефіцієнт вагомості			Характеристики	Рівень якості, бали
	ПКВ	ВЦК	МФВ		ПКВ	ВЦК	МФВ		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Зовнішній вигляд	0.2	0.2	0.2	Інтенсивність забарвлення	0.9	0.1	0.9	Сильна	5
								Слабка	4
								Помітна	3
								Ледь помітна	2
								Відсутня	1
				Прозорість	0.1	0.9	0.1	Сильна	5
								Слабка	4
								Помітна	3
								Ледь помітна	2
								Відсутня	1
Смак та запах	0.2	0.2	0.2	Виразність (бобового смаку та запаху)	0.4	0.4	0.4	Сильна	1
								Помірна	2
								Слабка	3
								Ледь помітна	4
								Відсутня	5
				Насиченість (бобового смаку та запаху)	0.3	0.3	0.3	Сильна	1
								Помірна	2
								Слабка	3
								Ледь помітна	4
								Відсутня	5
				Збалансованість				Відмінна	5
								Добра	4
								Задовільна	3
								Незадовільна	2
								Погана	1
				–	1.0	1.0	1.0	–	–

Закінчення таблиця 6.3

Консистенція	0.4	0.3	0.2	Щільність, міцність	0.1	0.2	0.3	Помірно ущільнена	5
								Ущільнена	4
								Щільна	3
								Дуже щільна	2
								Тверда	1
				Липкість	0.1	0.3	0.3	Середня	5
								Помірна	4
								Задовільна	3
								Висока	2
								Надто висока	1
				М'якість	0.1	0.2	0.2	Помірно м'яка	5
								М'якувата	4
								Помірно тверда	3
								Тверда	2
								Надто тверда	1
				Розтяжність	0.7	0.3	0.2	Відмінна	5
								Добра	4
								Середня	3
								Слабка	2
								Дуже слабка	1
–	1.0	1.0	1.0	–	–				
Здатність до формування	0.2	0.3	0.4	Ступінь виявлення	1.0	1.0	1.0	Відмінно	5
								Добре	4
								Задовільно	3
								Незадовільно	2
								Погано	1
				–	1.0	1.0	1.0	1.0	–

Матеріали. Молочна сироватка суха демінералізована, виготовлена із сироватки підсирної із 90% рівнем демінералізації згідно із ТУ У 15.5-00413890-089:2014 (табл. 6.4); марципанова паста, виготовлена за традиційною технологією; модельні системи марципанових паст із додаванням МССД у концентраціях 10...40% (табл. 6.5), та гліцерину харчового (ТУ У 10.8-40570177-001:2016) – 1...6% (табл. 6.6) від загальної маси сухих компонентів марципанової маси (мигдального ядра та цукрової пудри).

Таблиця 6.4

Фізико-хімічні та органолептичні показники МССД

Назва показника	Характеристика і норма
Смак і запах	Солодка, без сторонніх присмаків та запахів
Зовнішній вигляд і консистенція	Тонкодисперсний порошок
Колір	Світло-кремовий
Масова частка сухих речовин, %	97,00
Масова частка золи, %	2,63
Масова частка лактози, %	75,92
Масова частка жиру, %	1,0
Масова частка білку, %	15,45
Кислотність титрована	4,7
Кислотність активна	5,825
Індекс розчинності	Повна розчинність

Таблиця 6.5

Рецептурний склад модельних систем марципанових паст, на 100 г

Найменування сировини	Контроль	Зразки з додаванням МССД, %			
		10	20	30	40
Цукрова пудра	43.0	38.0	33.0	28.0	23.0
Патока	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0
МССД	-	10.0	20.0	30.0	40.0

Таблиця 6.6

Рецептурний склад модельних систем марципанових паст з МССД, на 100 г

Найменування сировини	Зразки з додаванням гліцерину, %					
	1	2	3	4	5	6
МССД 20 %						
Мигдальне ядро	32.5	32.0	31.5	31.0	30.5	30.0
Цукрова пудра	32.5	32.0	31.5	31.0	30.5	30.0
Патока	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0
МССД	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Гліцерин	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
МССД 30 %						
Мигдальне ядро	27.5	27.0	26.5	26.0	25.5	25.0
Цукрова пудра	27.5	27.0	26.5	26.0	25.5	25.0
Патока	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0
МССД	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
Гліцерин	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0

Методи. Сенсорні властивості модельних систем марципанових паст визначали за розробленими шкалами органолептичних дескрипторів. Марципанові пасти з МССД диференціювали залежно від сенсорних особливостей консистенції: марципанові пасти для покриття кондитерських виробів; в якості прошарку для борошняних та кондитерських виробів (далі – ПКВ); марципанові пасти для виготовлення цукерок, батончиків, плиток; для моделювання фігурних виробів (далі – МФВ).

Дослідження реологічних властивостей контрольних та дослідних зразків здійснювали за допомогою плоскопаралельного еластометра модифікації Толстого, що заснований на визначенні деформації зсуву, віднесеного до товщини зразка за постійного напруження (рис.6.3).

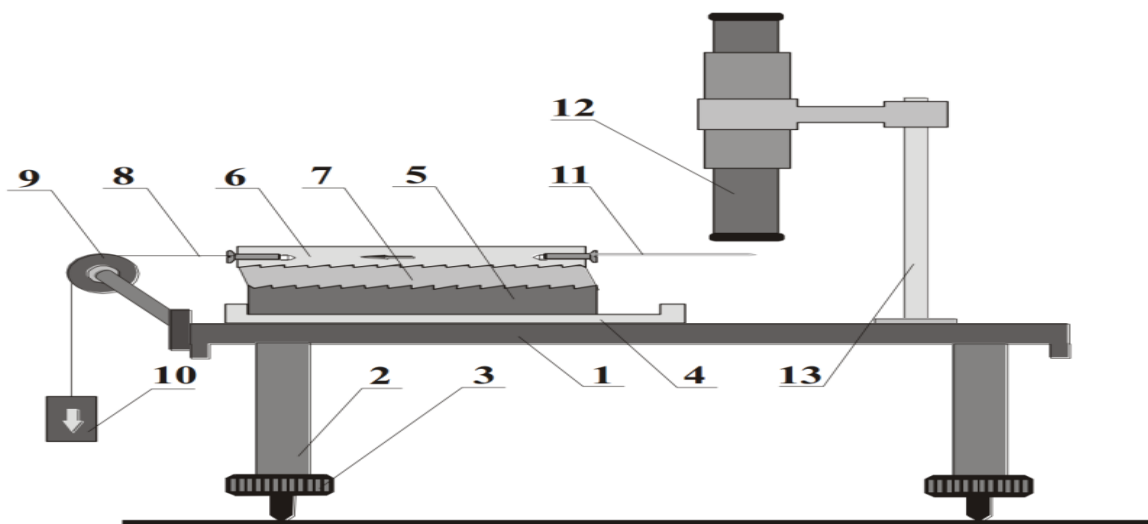


Рис. 6.3. Схема установки плоскопаралельного еластометра Толстого:
 1 – стіл; 2 – опорна ніжка; 3 – регулювальний гвинт; 4 – металева підставка;
 5 – металева пластина; 6 – пластина з плексиглазу; 7 – дослідний зразок;
 8 – шовкова нитка; 9 – блок; 10 – вантаж; 11 – спостережна голка;
 12 – мікроскоп; 13 – штатив

Під час дослідження реологічних характеристик модельних систем підбирали фіксоване навантаження для всіх варіантів (65 г), забезпечували однакову температуру (+6°C) і висоту зразків (7 мм).

Дослідження поверхневих характеристик контрольних та дослідних зразків проведено на динамометрі, підключеному до вимірювального приладу MIG-1.3. Він дозволяє охарактеризувати ступінь прилипання різних за структурою матеріалів при їх поверхневому контакті. Міцність адгезії визначали методом нормального відриву сталевієї пластини від

структурованого тіла (марципанової пасти). Області пошуку одержаних даних результатів експериментального масиву оптимальної масової частки МССД та гліцерину в марципанових пастах проведена за відомими методиками та методами статистичного оброблення з використанням відомої методики кореляційного та регресійного аналізу експериментальних результатів з використанням диференціальних операторів програми MathCAD-14 для одержання емпіричних рівнянь регресії, що дозволяє якісно і кількісно оцінити характеристики при підборі інгредієнтів матриці [20].

6.5. Наукові гіпотези

Марципанова паста. Обмежені допустимі навантаження на марципанову пасту вимагають додержання умов при дії сил адгезії й тертя в ролі сил рушійних і сил опору. Тому інтересом оптимізованого синтезу залишається інформація відносно явищ і особливостей адгезії. Важливою умовою стосується для забезпечення відсутності буксування при нанесенні пасти на поверхню напівфабрикату. Оскільки кут змочування виступає важливим фактором впливу.

Дана робота спрямована на створення та дослідження перспективи використання марципанової пасти на основі раціональної концентрації гліцерину з молочною сироваткою сухою демінералізованою. Оцінка основної закономірності зміни рецептурного складу і властивостей марципанової пасти [4] ґрунтується на оптимальних параметрах і режимах при її реологічних властивостях. Рецептурний склад встановлює вірогідність отриманих результатів структуроутворення, необхідних для опису споживчих властивостей.

Тому забезпечення в рецептурному складі марципанових паст раціональної концентрації гліцерину з молочною сироваткою сухою демінералізованою заданих (бажаних) реологічних, поверхневих характеристик, дозволить сприяти в тій чи іншій мірі у технологічній доцільності використання її.

Розв'язання задачі здійснювалося методом моделювання оцінки зовнішніх впливів на реакції і відгуки марципанової пасти на основі математичних формалізацій.

Статичний аналіз.

Особливості впливу гліцерину і молочної сироватки сухої демінералізованої при утворенні структури марципанової пасти і умов для досягнення раціональних реологічних параметрів, можливо прогнозувати за адгезією пасти.

При розробці рецептурного складу марципанових паст було проведено цілий комплекс реологічних досліджень. Для уточнення ролі гліцерину та молочної сироватки сухої демінералізованої здійснено планування і постановку обчислювальних експериментів з одержанням відповідних рівнянь регресії. Залежність структурно-механічних властивостей паст від вмісту МССД та гліцерину були побудовані за методом довільного плану експерименту.

За результатами реологічних досліджень встановлено, що не рекомендується збільшувати концентрацію гліцерину понад 5%. Дані результати підтверджується результатами сенсорного аналізу. Методом компромісних рішень визначено зони раціональних концентрацій МССД та гліцерину у складі марципанових паст. Відповідно були визначені змінні фактори, критерії оптимізації, а також, знайдена область визначення факторів.

Визначені математичні залежності основних структурно-механічних показників марципанових паст від вмісту гліцерину та МССД мають вигляд:

1. за показником міцності:

$$\begin{aligned}
 Y1_{\text{пкв}} &= -2.35x_1^2 - 1.25x_2^2 - 3.14x_3^2 + \\
 &+ 0.13x_1x_2 - 1.52x_1x_3 + 0.89x_2x_3 + \\
 &+ 7.27x_1 + 4.81x_2 - 6.73x_3 + 21.07, \\
 Y1_{\text{мфв}} &= -1.08x_1^2 - 0.48x_2^2 - 0.26x_3^2 + \\
 &+ 0.09x_1x_2 - 0.87x_1x_3 + 1.02x_2x_3 + \\
 &+ 5.48x_1 + 3.48x_2 - 4.27x_3 + 7.12.
 \end{aligned}$$

2. за показником розтяжності:

$$\begin{aligned}
 Y2_{\text{пкв}} &= 11.6 \times 10^{0.41x_1} - 0.05x_2^2 - 2.12x_3^2 + \\
 &+ 4.67x_1x_2 - 2.37x_1x_3 + 0.16x_2x_3 + \\
 &+ 9.67x_1 + 0.44x_2 - 7.56x_3 + 97.14, \\
 Y2_{\text{мфв}} &= 18.6 \times 10^{0.27x_1} - 1.08x_2^2 - 0.67x_3^2 + \\
 &+ 3.44x_1x_2 - 1.04x_1x_3 + 0.78x_2x_3 + \\
 &+ 4.41x_1 + 5.48x_2 - 6.12x_3 + 122.12.
 \end{aligned}$$

3. за показником здатності до формування:

$$\begin{aligned}
 Y3_{\text{пкв}} &= -0.18x_1^2 - 0.73x_2^2 - 2.61x_3^2 + \\
 &+ 0.04x_1x_2 - 2.94x_1x_3 + 7.45x_2x_3 + \\
 &+ 2.45x_1 - 3.57x_2 + 1.54x_3 + 2.8, \\
 Y3_{\text{мфв}} &= -0.15x_1^2 - 0.46x_2^2 - 3.07x_3^2 + \\
 &+ 2.01x_1x_3 + 6.37x_2x_3 + 1.76x_1 - \\
 &- 2.31x_2 + 1.04x_3 + 3.9,
 \end{aligned}$$

де $Y1_{ПКВ}$ – міцність марципанової пасти, бали;

$Y1_{МФВ}$ – міцність марципанової пасти МФВ, бали;

$Y2_{ПКВ}$ – розтяжність марципанової пасти ПКВ, бали;

$Y2_{МФВ}$ – розтяжність марципанової пасти МФВ, бали;

$Y3$ – здатність до формування, бали; X_1 – вміст МЯ та ЦП, %;

X_2 – вміст гліцерину, %;

X_3 – вміст МССД, %.

Шляхом інтегрування отримано функції та визначено області оптимальних параметрів вмісту гліцерину та МССД у марципанових пастах (табл. 6.7).

Таблиця 6.7

**Область оптимальних параметрів вмісту гліцерину та МССД
у марципанових пастах**

Моделльні композиції марципанових паст	X_1 (гліцерин), %			X_2 (МССД) %		
	$X_{1\min}$	$X_{1\max}$	Оптимальне значення	$X_{2\min}$	$X_{2\max}$	Оптимальне Значення
Марципанова паста (МФВ)	4,8	5,3	5,0	27,0	33,7	30,0
Марципанова паста (ПКВ)	4,4	4,5	5,0	18,2	22,4	20,0

Оптимальні значення обрані шляхом заокруглення оптимізованих значень в межах компромісних областей, з метою полегшення дозування компонентів рецептури марципанових паст у виробничих умовах.

Отже, за результатами реологічних і сенсорних досліджень підтверджено можливість внесення МССД Дурецептурний склад марципанових паст у концентрації 10...20%, що дає змогу покращити їх сенсорні, технологічні та функціональні властивості.

Оптимізація рецептурного складу бобових паст. За результатами досліджень органолептичних та структурно-механічних характеристик методом планового експерименту встановлені зони раціональних концентрацій МССД та кокосового масла в рецептурному складі бобових паст відповідно до напрямку їх технологічного використання.

Залежності комплексного реологічного показника від вмісту кокосового масла та МССД описуються наступними математичними моделями:

$$Y_{ПКВ} = 3,3 \times 10^{-5} x_1^2 x_2^2 + 0,00136 x_1 x_2^2 + 0,00121 x_1^2 x_2 - 0,0106 x_1^2 - 0,0188 x_2^2 + 0,4423 x_1 + 0,6792 x_2 - 0,9208$$

$$Y_{ВЦК} = 2,92 \times 10^{-5} x_1^2 x_2^2 - 0,000515 x_1 x_2^2 - 0,000692 x_1^2 x_2 + 0,0131 x_1 x_2 - 0,00091 x_2^2 + 0,00841 x_1 - 0,072 x_2 + 4,856$$

$$Y_{МФВ} = 3,64 \times 10^{-5} x_1^2 x_2^2 - 0,002 x_1 x_2^2 - 0,00065 x_1^2 x_2 + 0,0373 x_1 x_2 - 0,0287 x_2^2 + 0,00597 x_1 - 0,546 x_2 + 4,917$$

де: x_1 – вміст кокосового масла, %;

x_2 – вміст МССД, %;

$Y_{ПКВ}$ – комплексний реологічний показник для бобової пасту ПКВ, бали;

$Y_{МФВ}$ – комплексний реологічний показник для бобової пасту МФВ, бали;

$Y_{ВЦК}$ – комплексний реологічний показник для бобової пасту ВЦК, бали.

Отримані дані дали змогу визначити оптимальне співвідношення компонентів розроблених бобових паст (табл. 6.8)

Таблиця 6.8

Параметри оптимізації рецептурних компонентів бобових паст

Зразки	Кокосове масло, %			МССД, %		
	Мінімальне значення	Максимальне значення	Оптимальне значення	Мінімальне значення	Максимальне значення	Оптимальне значення
ПКВ	9.8	10.3	10.0	19.4	22.5	20.0
ВЦК	9.7	10.1	10.0	9.8	10.5	10.0
МФВ	9.8	10.2	10.0	29.4	31.1	30.0

Оптимальні значення обрані шляхом заокруглення оптимізованих значень в межах компромісних областей, з метою полегшення дозування рецептурних компонентів бобових паст у виробничих умовах.

6.6. Результати досліджень марципанових паст

Задоволення потреб у високоякісних продуктах харчування – одна з основних соціально-економічних проблем сьогодення. Питанням якості (**The European Commission, 2005.**), зокрема розробці нових видів продукції на вітчизняних харчових підприємствах, сьогодні приділяють усе більшу увагу. Споживання або підтримка збалансованого і живильного раціону забезпечується реалізацією національних програм з поліпшення якості харчових продуктів та інтегрованою системою безпеки харчових продуктів.

Саме тому проблеми забезпечення безпеки та якості продукції стають усе більш актуальними для підприємств харчової промисловості України. Цьому сприяє і перехід країни на нові політичні й економічні відносини з країнами Європейського Союзу.

Проведений глибокий аналіз реологічних і сенсорних досліджень нових розроблених марципанових паст спрямовує обґрунтувати поведінку при їх використанні. На основі визначених оптимальних значеннях марципанової пасти ПКВ, проводимо адгезійний аналіз. Вивчення нанесення марципанових паст на кондитерські напівфабрикати дозволяє визначити і обґрунтувати раціональність рецептурного складу. Визначені реологічні характеристики дозволяють якісного вироблених кондитерських виробів.

Теоретична оцінка адгезії в даний час дуже приблизна, що пояснюється не тільки недосконалістю рівнянь, за якими розраховуються сили міжмолекулярних зв'язків, але й тим, що неможливо оцінити реальну кількість зв'язків, які припадають на одиницю площі. Крім того, важко оцінити справжню площу контакту, яка завжди при візуальнім спостереженні значно більша, завдяки наявності шорсткості в поверхневому шарі.

Адгезія [28, 29] як поверхнєве явище пов'язана з реологічними параметрами і характеризує об'ємні властивості марципанових паст. Вона виникає на межі розподілу двох фаз різнорідних конденсованих тіл: марципанова паста – одна фаза, поверхня контакту – друга фаза, що викликає зчеплення. Об'ємні властивості пасти визначають площу контакту двох тіл, що впливає на величину адгезії і її наслідок, який характеризує стан поверхні після видалення прилиплої маси пасти.

У адгезії є супутні явища [4], які характеризують об'ємні властивості харчових мас та істотно впливають на адгезійну взаємодію компонентів марципанових паст. Вплив об'ємних характеристик [13] харчових мас на поверхнєві властивості можна простежити розглядаючи співвідношення адгезії та когезії. У разі адгезії має місце межа розподілу фаз, для когезії [30] така межа відсутня. Когезія – це опір тіла руйнування, пов'язаного з подоланням сил взаємодії між атомами і молекулами на поверхні розділу і означає зв'язок всередині марципанових паст, тобто в межах однієї фази.

В процесі прикладання зусиль на марципанову пасту при її нанесенні на заготовку відбувається фрекційна взаємодія їх поверхонь. Характер течії маси марципанової пасти у вигляді різного профілю визначається структурно-механічними властивостями та силою взаємодії (прилипання) із поверхнями контакту. Отже, величину адгезії в даному випадку характеризуємо силою

відриву, питомою роботою відриву відносно одиниці площі, часом контакту для зміни умов зв'язку між субстратом і адгезивом при дії навантаження. Тому характерно максимальне збільшення сил взаємодії пасти із площею контакту заготовки. Порушення цих взаємних співвідношень призводить до випуску неякісної продукції та зменшення ефективності процесу. Явище взаємодії вище згаданих тіл досить мало вивчені, а природа адгезії вимагає дослідження. В роботах [31] часто природу адгезії пояснюють дифузійною і електричною теорією. Адгезія [31] завжди є результат міжмолекулярної взаємодії поверхонь, різних по своїй природі.

У харчовій помисловості існує багато процесів в яких одночасно взаємодіють сили тертя і адгезії. Ці явища виникають при відносному зміщенні контактуючих поверхонь двох тіл. У дослідженнях [31] розглянуто одночасну взаємодію сили тертя і адгезії та встановлено їх зв'язок. Закон виражає пропорційність сил тертя до нормального навантаження. Деякі дослідники вважають, що єдиною причиною зовнішнього тертя є сили притягання між поверхнями тіл. При адгезії рідких і пружно-пластичних харчових мас [32] може виникати хімічний зв'язок.

В нашому процесі між контактуючими фазовими частинами виникає меніск рідини. В такому випадку він ніби стягує частинку і поверхню. Величина адгезії буде визначатися капілярною силою:

$$F_k = 4\pi\sigma_T r \quad (6.1)$$

де $\sigma_{\text{рт}}$ – поверхневий натяг рідини конденсованої між контактуючими тілами.

Відповідно [32, 33] відбувається розпливання тонкого шару рідини, яка знаходиться на поверхні тіл.

Якщо «адгезію» чи «силу адгезії» оцінювати за залежністю М. Стефана й Горбатова (Урьев Н., 1988), то такий процес проходить в часі, тобто адгезія оцінюється як процес, який необхідно виконати для відриву зразків. Віддаль розходження може характеризувати явище когезії. В даному випадку притискання двох тіл відбувається капілярною взаємодією:

$$P = 2\alpha F \cos\beta / h = 2\alpha F_k / h \quad (6.2)$$

де α – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м;

$\cos\beta$ – характеризує змочування поверхні;

α' – коефіцієнт поверхневого натягу при повному змочуванні, Н/м;

h – товщина шару марципанової пасти, м.

Якщо припустити, що сила прикладена з зовні до пасти збільшується лінійно в часі:

$$P = \omega_c \cdot \tau,$$

де ω_c – швидкість збільшення сили, Н/с;

τ – час, с.

Приймаючи, що площа контакту також змінюється за лінійним законом, отримаємо:

$$S = S_0 \cdot C\tau \quad (6.3)$$

де C – коефіцієнт пропорційності, який залежить від властивостей продукту і характеризує темп зменшення площі;

S_0 – біжуче значення площі дійсного контакту, м².

Підставляючи (6.2 і 6.3) у залежність М. Стефана й Горбатова із врахуванням, що в момент відриву його час $t_0 = P_0 S / \omega_c$ одержимо:

$$P_0 = \frac{2\alpha}{h} \cdot \frac{\omega_c}{\omega_c + \frac{2\alpha \cdot C}{h}} \quad (6.4)$$

Для зручності рівняння представляється у вигляді (6.5)

$$\frac{1}{P_0} = \frac{h}{2\alpha} \cdot \frac{C}{\omega_c} \quad (6.5)$$

Оскільки, прийнято, що зростання сили і зміна площі контакту лінійно залежать від часу, то можна прийняти, що C/ω_c – є постійною величиною A , тобто:

$$\frac{1}{P_0} = \frac{h}{2\alpha} + A \quad (6.6)$$

Величина адгезії прямо пропорційна поверхні натягу марципановій пасти і обернено пропорційна товщині її шару. Дана залежність (6.6) може мати місце при невеликій товщині шару продукту.

Оперуючи такими термодинамічними поняттями, як вільна поверхнева енергія і поверхневий натяг, можна описати деякі етапи адгезійної взаємодії процесу нанесення марципанової пасти на поверхню борошняної кондитерської заготовки, рисунок 2 (змочування адгезивом поверхні субстрату). Незважаючи на виключну важливість, процеси змочування і адгезії до цих пір недостатньо зрозумілі, вивчення їх продовжується в усіх розвинених країнах. Дослідників тепер особливо цікавить кінетика змочування, нерівноважне змочування та інші сторони процесів змочування. Природу їх взаємодії розглядаємо як процес, що відбувається на межі контакту трьох фаз. Змочування [28] – це також прояв молекулярних сил, прояв спорідненості адгезиву до субстрату.

В роботі (Olga Shanina) використано методику вивчення поверхневого натягу на межі розділу між фазами, що дозволили отримати дуже достовірні дані досліджень. Вивчення змочування різних субстратів представляє інтерес в тому відношенні, що дозволяє виявити спорідненість адгезиву до субстрату, порівняти молекулярні сили, що діють в різних системах адгезив-субстрат.

Всі відомі методи і пристрої визначення поверхневого натягу розглянуті і проаналізовані в роботах (WuSouheng, 1973; Ли Л.-Х. П, 1979; Адамсон А., 1979; Райдил Э., 1936; Урьев Н., 1988). Причому, в роботі авторів [21, 35] описані технічні засоби, які дають можливість автоматизувати процес вимірювання.

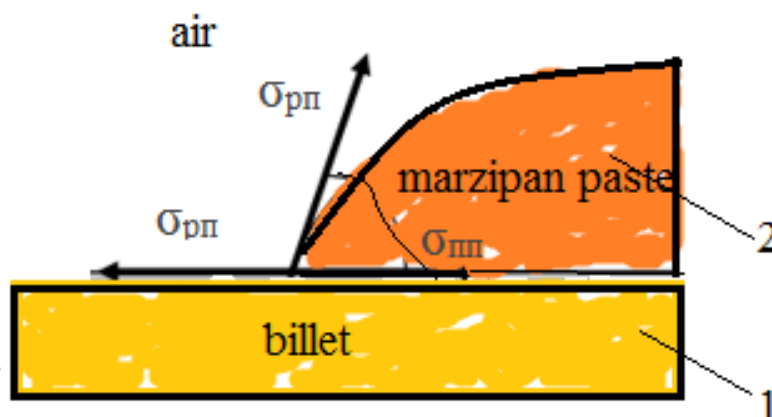


Рис. 6.3. Рівновага сил, що впливає на кут контакту марципанової пасти 2 з поверхнею заготовки 1

При нанесенні марципанової пасти на тверду поверхню заготовки, як відзначено раніше, відбувається процес мимовільного збільшення площі контакту, має місце змочування. Шар пасти, що наноситься по поверхні твердої

кондитерської заготовки є особливим фізичним об'єктом, форма і структура якої визначено рецептурним складом.

В роботі [31, 35] відзначено, що нанесення вязкої рідини при її текучості залежить від умов зовнішнього середовища і властивостей поверхні на яку наносять. Запропоновані наші марципанові пасти повинні забезпечувати плавне їх нанесення (змочування) поверхні субстрату, а також міжфазовий контакт між адгезивом і субстратом і міжфазну або адсорбційну взаємодія на межі двох фаз. Для досягнення хорошого нанесення пасти (змочування) із хорошою адгезією, необхідно, щоб поверхневий натяг адгезиву був більшим поверхневого натягу субстрату. Явище змочування пов'язано зі співвідношенням поверхневих натягів (σ) адгезиву і субстрату.

Умови нанесення пасти (змочування) твердої поверхні. Якщо до зіткнення з поверхнею шар пасти мав поверхню S_k , а поверхня твердої заготовки була S_T , то в стані рівноваги, коли шар пасти утворює на поверхні тіла краплю певної форми, площа поверхні їх зіткнення складе S_{pc} , а площа поверхні пасти S_p . Загальна вільна поверхнева енергія в початковий момент становить

$$E = S_k \sigma_n + S_T \sigma_T \quad (6.7)$$

У кінцевий момент, після досягнення рівноваги, загальна вільна поверхнева енергія складе

$$E_2 = S_n \sigma_n + S_{III} \sigma_{III}$$

Відомо [25, 28], що необхідна умова мимовільного протікання процесу нанесення пасти полягає в тому, щоб відбувся спад вільної поверхневої енергії. В нашому випадку при зупинці нанесення (дії напруження зсуву) спад відбувається досить швидко

$$\Delta E = (E_1 - E_2) < 0 \quad (6.8)$$

Для даної умови нанесення пасти справедлива нерівність

$$\frac{\sigma_T - \sigma_{Tn}}{\sigma_n} > \frac{S_n - S_k}{S_{III}} \quad (6.9)$$

Звідси випливає, що при $\sigma_T > \sigma_{\text{тп}}$ відбувається збільшення поверхневого зіткнення пасти із середовищем ($S_{\text{п}} > S_{\text{к}}$). Таким чином, нанесення (змочування) термодинамічно можливо за умови $\sigma_T > \sigma_{\text{тп}}$.

Рівновага щару пасти на поверхні твердого тіла (без урахування шорсткості поверхні і дії сили тяжіння) підпорядковується рівнянню Юнга з якого випливає,

$$\sigma_T = \sigma_{nT} + \sigma_n \cos\theta$$

де θ – крайовий кут, або кут змочування.

З якого випливає

$$\cos \theta = \frac{\sigma_T - \sigma_{\text{тп}}}{\sigma_n}$$

Аналіз стану рівноваги в потрійній системі (тверде тіло – рідина – газ (повітряне середовище) призводить до залежності виду

$$\sigma_T = \sigma_{\text{п}} \frac{1 + \cos\theta}{1 - \cos\theta} \frac{\sigma_T - \sigma_{\text{тп}}}{\sigma_n} > \frac{S_n - S_{\text{к}}}{S_{\text{тп}}} \quad (6.10)$$

Міжфазний поверхневий натяг (Урьев Н., 1988) для двох середовищ визначається правилом Антонова, згідно з яким поверхневий натяг дорівнює різниці поверхневих натягів кожної з фаз окремо. Приймаючи це припущення стосовно систем тверде тіло – рідина, можна записати

$$\sigma_{\text{тп}} = | \sigma_T - \sigma_{\text{п}} | = | \sigma_{\text{п}} - \sigma_T |,$$

Тоді, використовуючи правило Юнга (Урьев Н., 1988) можна отримати простий вираз для значення поверхневої енергії твердого тіла:

$$\sigma_T = | \sigma_n - \sigma_T | + \sigma_n \cos\theta \quad (6.11)$$

$$\sigma_T + \sigma_T = \sigma_n + \sigma_n \cos\theta \quad (6.12)$$

$$2\sigma_T = \sigma_n (1 + \cos\theta) \quad (6.13)$$

$$\sigma_T = \frac{1}{2} \sigma_n (1 + \cos\theta) \quad (6.14)$$

Звідси випливає, що визначення величини поверхневої енергії твердого тіла можливо за результатами вимірювання крайового кута змочування, тобто шару нанесення пасти (рис. 6.4).



Рис. 6.4. Розпливання марципанової пасти:

1 – початок нанесення; 2 – час вистоювання 3хв; 3 – час вистоювання 7 хв

Визначення кута змочування марципанових паст. Дослідження кута контакту θ визначався методом динамічного вимірювання, за умов що границя розділу фаз рухається і відбувається зміна кута контакту в часі – метод зміни об'єму краплі (рис. 6.4.). Серед даних процесів сорбція і розчинення в прикордонному шарі двох контактуючих фаз сприяє дифузії атомів (молекул) через шар кондитерської заготовки та пасти десорбуватися і виділяти вологу.

Методом оперативного визначення кута змочування проведено розрахунок значень похідної в точці контакту марципанової пасти з твердою поверхнею бісквітної заготовки. Поверхня марципанової пасти не описується простими аналітичними виразами. Для аналітичного опису лінії профілю такої поверхні можна скористатися апроксимаційним поліномом виду:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$$

де x і y – відповідно вертикальна і горизонтальна координати точки поверхні марципанової пасти;

a_0, a_1, a_2, a_3 – коефіцієнти поліному.

Значення кута в такому випадку можна знайти визначивши похідну в точці трифазного контакту

$$y' = \operatorname{tg}\theta = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2$$

Очевидно, при $\sigma_T < \sigma_{II}$ і $\cos \Theta < 0$, тобто коли марципанова паста не прилипає (змочує) до поверхні, крайовий кут Θ повинен бути меншим 90° . Якщо кут змочування більше 90° , відбувається часткове змочування. При $\Theta = 0$, коли крайовий кут не утворюється, має місце повне змочування, або розтікання, що в наших умовах не відбувається.

$$\sigma_T > \sigma_{II} + \sigma_{III}. \quad (6.15)$$

Таким чином, крайовий кут змочування Θ або $\cos \Theta$ є міра нанесення марципанової пасти. При проявленні фізико-хімічного гістерезису крайові кути змочування марципанової пасти залежать від часу контакту фаз, під час нанесення на поверхню заготовки. Поверхню заготовки марципанова паста вкриває повністю, без утворення пустот. Тому форма краплі відповідає мінімуму вільної енергії.

У нашому випадку використаємо формулу

$$\theta_z = \left| \arctg (a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2) \right|$$

Відповідно нашим дослідженням та обробки даних, рівняння контакту нанесення пасти при куті θ буде:

$$y' = -0.677 + 1.641x + 0.013x^2 + 2.454 \cdot 10^{-3}x^3$$

Рівняння для визначення кута θ буде:

$$\theta_z = \left| \arctg (1.641 + 0.013x + 2.454 \cdot 10^{-4}x^2) \right|$$

Отже, для досягнення високої адгезії необхідно, щоб поверхневий натяг пасти мав великі значення. Також необхідно, щоб поверхневий натяг твердого кондитерського виробу був більше поверхневого натягу пасти, що стикається з ним. При таких умовах буде забезпечуватися нанесення адгезиву по поверхні субстрату

$$\sigma_{\text{субстрат}} > \sigma_{\text{адгезив}}. \quad (6.16)$$

Якісне нанесення марципанової пасти на борошняну кондитерську заготовку дозволяє проникненню вологи у деякі її шари. Нами проведено зріз нанесення пасти до і після 30 с її контакту. Фотографії зрізу під мікроскопом подано на рис. 6.5.

Відповідно до розробленої рецептури, для визначення швидкості проникнення вологи марципанових паст в поверхню кондитерської заготовки було використано ваговий метод дослідження за температури 25°C.

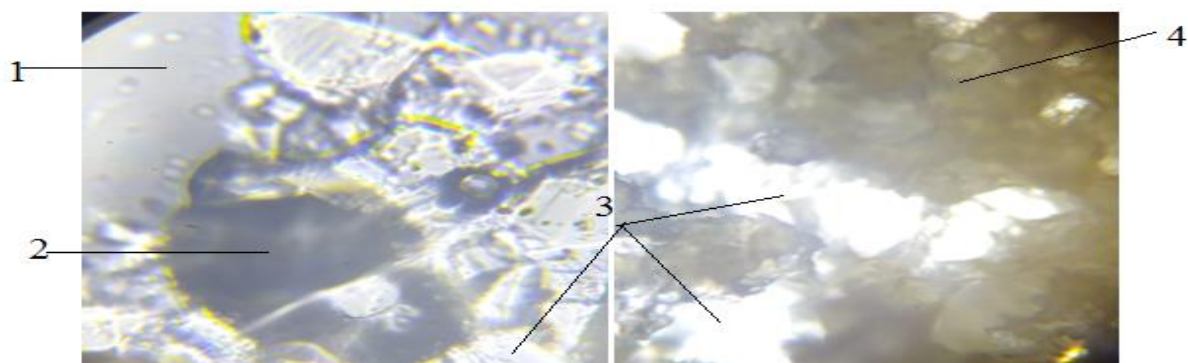


Рис. 6.5. Фотографії проникнення вологи марципанової пасти в тверду поверхню борошняної заготовки: 1 – марципан; 2 – заготовка; 3 – повітряні порожнини в заготовці; 4 – проникнення вологи пасти

Кількість вологи, що проникла крізь поверхню кондитерської заготовки періодично зважували з похибкою не більш ніж 0,001 г. Зміна маси заготовки й визначає кількість вологи, що проникла крізь досліджуваний матеріал. Експериментально встановлені залежності зміни маси дослідних зразків у часі, що вимірювався в хв, показані на рис. 6.6.

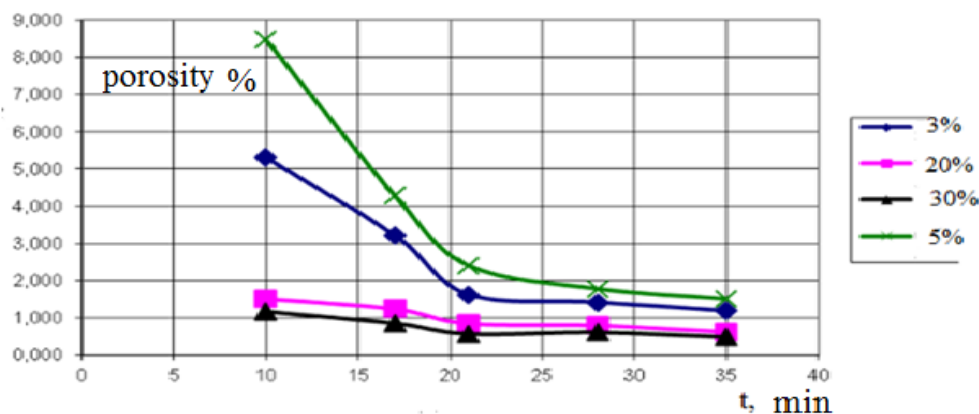


Рис. 6.6. Швидкості проникності вологи марципанових паст у поверхню заготовки

З наведених на рис. 6.6 графіків витікає, що поглинаюча здатність зразка покритого марципановою пастою з вмістом 20% та 30% МССД залишалась сталою на протязі 15–20 хв від початку експерименту. Менш щільна молекулярна структура марципанової пасти з гліцерином спричиняють більшу спроможність до пропускання вологи в заготовку. Вона може бути бажаною для активного нанесення і покриття кондитерських напівфабрикатів.

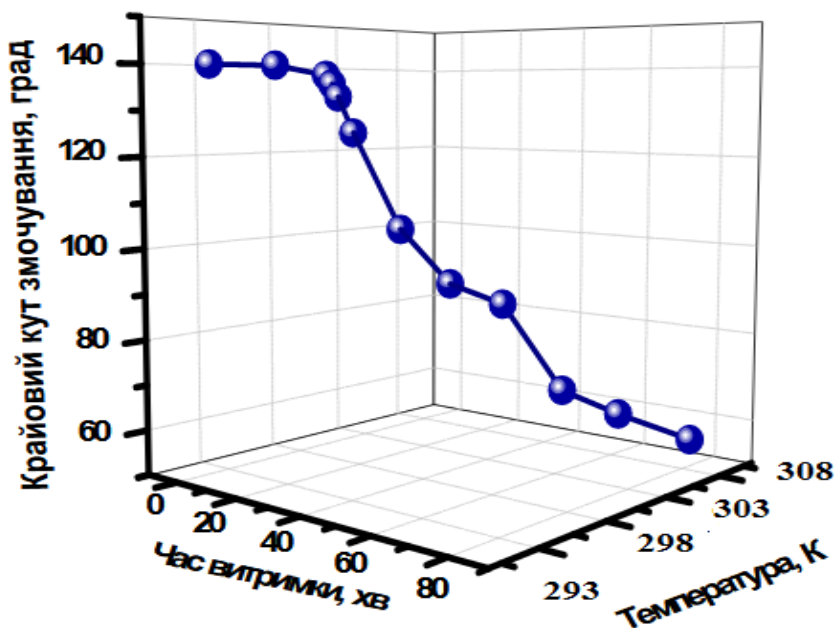


Рис. 6.7. Залежності крайового кута змочування від температури середовища та часу витримки для системи паста-кондитерська заготовка

Досліджено температурну та часову залежності змочування. На рис. 6.7 представлено результати експериментів. Показано, що в інтервалі температур 293–308 не створюються умови змочування поверхні заготовки ($\theta > 90$ град). Залежність крайового кута змочування в системі марципанова паста – бісквітна заготовка від температури є нелінійною, що може свідчити про хімічну взаємодію. Розрахунок зміни температур показав, що ймовірність перебігу такого процесу суттєво залежить від температури експерименту. Процес протікання на адгезійних границях при контакті пасти з заготовкою найкраще проходить при температурах, які присутні у виробничих приміщеннях: 20–25⁰С, що і спостерігається поліпшення змочування в системі.

Розрахунок роботи процесу. Ефективність даної модифікації можна оцінити шляхом розрахунку роботи адгезії (W_a), яка визначається (Зимон А., 1974) співвідношенням поверхневих енергій адгезиву, субстрату, а також міжфазовою енергією:

$$W_a = \sigma_{ng} + \sigma_{Tg} - \sigma_{Tn} \quad (6.17)$$

де σ_{ng} – поверхневий натяг пасти (адгезиву) на кордоні з газом (Повітрям), МДж/м²;
 σ_{Tg} – поверхневий натяг твердого тіла (субстрату) на кордоні з газом (повітрям), МДж/м²;
 σ_{Tn} – міжфазовий поверхневий натяг, МДж/м².

З урахуванням рівняння Юнга робота адгезії може бути визначена за формулою, в якій використовуються величини, доступні експериментальному визначенню:

$$W_a = \sigma_{ng} (1 + \cos\theta) \quad (6.18)$$

З урахуванням міжфазової взаємодії більш точне значення роботи адгезії може бути визначено за формулою:

$$W_a = \sigma_{пг} (2 + b \cdot \sigma_{кр}) - b \cdot \sigma_{жг}^2, \quad (6.19)$$

де b – коефіцієнт пропорційності, що дорівнює тангенсу кута нахилу, залежно $\cos\theta = f(\sigma_{п})$ до осі абсцис.

$\Sigma_{кр}$ – критичне значення поверхневого натягу адгезиву, при якому забезпечується повне змочування, МДж/м² (за величиною дорівнює значенню поверхневого натягу субстрату).

Залежність (6.19) є рівняння параболи, вершина якої знаходиться при такому значенні поверхневого натягу адгезиву:

$$\sigma_{ng} = \frac{1}{b} + 0.5\sigma_{кр} \quad (6.20)$$

При цьому максимальна робота адгезії визначається залежністю виду:

$$W_{a\max} = \frac{1}{b} + \sigma_{кр} + 0.25b\sigma_{кр}^2 \quad (6.21)$$

На рис. 4.9 представлена залежність роботи адгезії від поверхневого натягу марципанової пасти з різним складом.

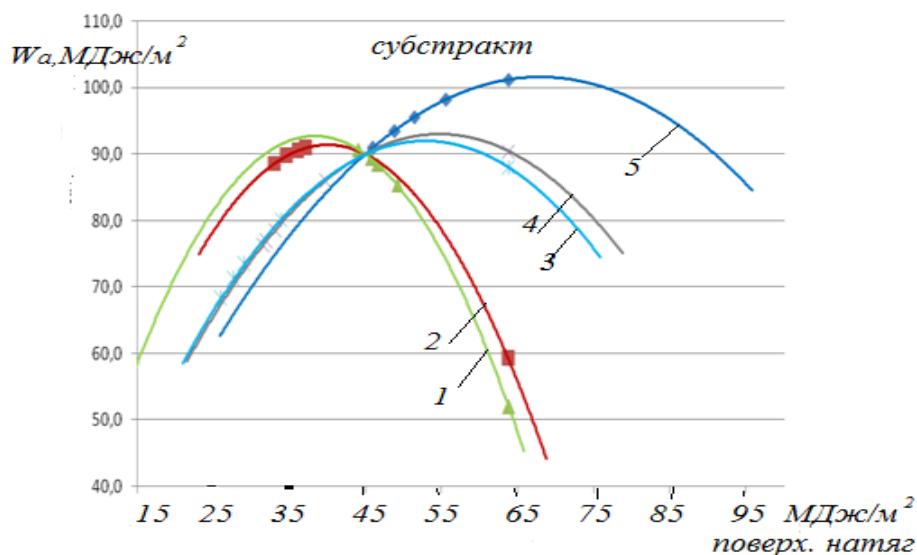


Рис. 6.9. Залежність роботи адгезії від поверхневого натягу марципанової пасти згідно рецептури: 1, 2 – гліцерину 3% і МССД 20%; 3, 4 – гліцерину 4% і МССД 25%; 5 – гліцерину 5% і МССД 30%

Проведені розрахунки і побудовані графічні залежності свідчать про підвищення роботи адгезії при використанні марципанових паст з МССД 20% і 30% та гліцерином до 5%. Найбільш ефективні показники марципанових паст (рис. 6.7 поз. 5) з 30% МССД та 5% гліцерину. Тому ця рецептура викликає найбільш значимий ефект у порівнянні з іншими рецептурами. Це пов'язано з забезпеченням якісного розподілу марципанової пасти і її адгезійних властивостей. Часткова заміна мигдального борошна на МССД у рецептурному складі марципанових паст приводить до зміни структурного стану та кількісних значень реологічних і сенсорних характеристик.

Показники загальної деформації з підвищенням концентрації гліцерину зростають не прямо пропорційно і залежать від масової частки МССД у складі марципанових паст. Відповідно при концентрації МССД 20% показники загальної деформації зростають в залежності від вмісту гліцерину в 1.0–1.2 рази, при концентрації МССД 30% зростають у 1.0...1.3 рази відповідно. Незворотна деформація при концентрації МССД 20% є постійною і не залежить від концентрації гліцерину. При концентрації МССД 30% з підвищенням концентрації гліцерину, зворотна деформація зростає у 1.5 рази. Зворотна деформація зростає прямо пропорційно загальній деформації.

Висновки. Актуальним напрямком удосконалення приготування марципанових паст є і залишається пошуком перспективних сировинних джерел та встановлення раціональних способів їх внесення, що дозволять

створити оптимальні умови із заданими біотехнологічними властивостями та встановлення механізмів і чинників їх формування.

З наведеного математичного аналізу обґрунтовано рецептуру і підбір параметрів приготування марципанових паст. Так в процесі формування встановлено зростання показників міцності адгезії із підвищенням концентрації МССД, що підтверджується сенсорними дослідженнями, суттєвим зростанням показників липкості. Поверхневі властивості паст в залежності від часу контакту з адгезивом та повітрям підтвердили факт подовження часу роботи, що є досить важливим фактором при моделюванні фігурних оздоблювальних напівфабрикатів, виготовлених ручним способом.

На основі проведених сенсорних і реологічних характеристик запропоновані напрями технологічного використання марципанових паст, в основу яких покладені структурні властивості. Марципанова паста ПКВ призначена для покриття та в якості прошарку для борошняних і кондитерських виробів, так як основним показником консистенції є розтяжність.

Встановлено найкращі показники при концентрації МССД 25% та гліцерину 4.5%. Для марципанової пасту МФВ, що використовуються для виготовлення цукерок, батончиків, плиток, а також моделювання фігурних виробів, основним критерієм характеристики консистенції є формуюча здатність пасту. Найкращі показники встановлені при концентрації МССД 30%.

6.7. Результати досліджень бобових паст

На основі розробленої технології та проведеної оптимізації рецептурного складу бобових паст нами вперше виконано дослідження реологічні і сенсорні, що спрямовані на обґрунтування поведінки при їх використанні. Експериментально досліджено вплив концентрації МССД на міцність адгезії модельних композицій бобових паст.

Таблиця 6.9

**Міцність адгезії ($\omega\alpha$) модельних композицій бобових паст з МССД
($n=5$, $P\leq 0,05$)**

Дослідні зразки	Міцність адгезії ($\omega\alpha$), Н/м ²
Контроль	38.2
Дослід 1 (МССД, 10%)	55.7
Дослід 2 (МССД, 20%)	64.4
Дослід 3 (МССД, 30%)	73.8

Дослідження залежності показників міцності адгезії дозволили встановити підвищення цього показника в 1.5–2 рази в порівнянні з контролем. Дані аналізу підтверджуються результатами органолептичного аналізу консистенції, про що свідчить суттєве підвищення липкості. Це призводить до ускладнень в роботі з даним видом розроблених паст. Враховуючи, що бобова паста має аналогічну марципановим багатофункціональність використання в кондитерському виробництві (Stadnyk, et al 2020) вважали за доцільне, наблизити показники міцності адгезії бобових паст з МССД до марципанових паст виготовлених за традиційною технологією. Так як бобова паста в порівнянні з марципановою характеризується меншою міцністю, то вважали перспективним компонентом кокосове масло. Воно обумовлено певними кристалізаційними властивостями.

Вплив кокосового масла на органолептичні та структурно-механічні властивості модельних композицій бобових паст з молочною сироваткою сухою демінералізованою. З метою визначення раціональної концентрації кокосового масла в рецептурному складі бобових паст з МССД розроблені модельні композиції.

Таблиця 6.10

Рецептурний склад модельних композицій бобових паст з МССД, на 100 г

Найменування сировини	Контроль	Зразки з додаванням кокосового масла, %				
		4	6	8	10	12
Бобова паста ПКВ						
Н/ф квасолеве пюре	80.0	78.0	77.0	76.0	75.0	74.0
МССД	20.0	18.0	17.0	16.0	15.0	14.0
Вода	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
Кокосове масло	-	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0
Бобова паста ВЦК						
Н/ф квасолеве пюре	90.0	88.0	87.0	86.0	85.0	84.0
МССД	10.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0
Вода	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Кокосове масло	-	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0
Бобова паста МФВ						
Н/ф квасолеве пюре	70.0	68.0	67.0	66.0	65.0	64.0
МССД	30.0	28.0	27.0	26.0	25.0	24.0
Вода	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
Кокосове масло	-	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0

Вплив кокосового масла на органолептичні показники модельних композицій бобових паст з МССД визначені відповідно до розробленої бальної шкали та наведені в таблиці 6.11.

Таблиця 6.11

**Органолептичні показники модельних композицій бобових паст з МССД
та кокосовим маслом**

Найменування показника	Коефіцієнт вагомості	Характеристика	Номер дескр.	Коефіцієнт вагомості	Зразки з додаванням кокосового масла, %				
					4	6	8	10	12
Бобова паста ПКВ									
Консистенція	0.4	Щільність, міцність	1	0.1	5.0	5.0	5.0	5.0	4.6
		Липкість	2	0.1	4.4	4.6	4.8	5.0	5.0
		М'якість	3	0.1	4.4	4.6	4.8	5.0	5.0
		Розтяжність	4	0.7	5.0	5.0	5.0	4.8	4.2
Сумарна оцінка за дескрипторами ПКВ					4.88	4.92	4.96	4.93	4.4
<i>Підсумкова оцінка за показником ПКВ</i>					<i>1.95</i>	<i>1.96</i>	<i>1.98</i>	<i>1.93</i>	<i>1.76</i>
Здатність до формування	0.2	Ступінь виявлення	1	1.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Сумарна оцінка за дескрипторами ПКВ					5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
<i>Підсумкова оцінка за показником ПКВ</i>					<i>1.0</i>	<i>1.0</i>	<i>1.0</i>	<i>1.0</i>	<i>1.0</i>
Загальна оцінка ПКВ					2.95	2.95	2.98	2.98	2.76
Бобова паста ВЦК									
Консистенція	0.3	Щільність, міцність	1	0.2	4.6	4.8	5.0	5.0	3.8
		Липкість	2	0.3	4.4	4.6	4.8	5.0	5.0
		М'якість	3	0.2	4.4	4.6	4.8	5.0	3.8
		Розтяжність	4	0.3	4.4	4.4	4.2	4.2	4.0
Сумарна оцінка за дескрипторами ВЦК					4.44	4.58	4.66	4.76	4.22
<i>Підсумкова оцінка за показником ВЦК</i>					<i>1.33</i>	<i>1.37</i>	<i>1.39</i>	<i>1.42</i>	<i>1.26</i>
Здатність до формування	0.3	Ступінь виявлення	1	1.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Сумарна оцінка за дескрипторами ВЦК					5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
<i>Підсумкова оцінка за показником ВЦК</i>					<i>1.5</i>	<i>1.5</i>	<i>1.5</i>	<i>1.5</i>	<i>1.5</i>
Загальна оцінка ВЦК					2.83	2.87	2.89	2.92	2.76
Бобова паста МФВ									
Консистенція	0.2	Щільність, міцність	1	0.3	5.0	5.0	4.8	4.8	3.8
		Липкість	2	0.3	4.4	4.6	4.8	5.0	5.0
		М'якість	3	0.2	4.6	4.8	5.0	5.0	3.8
		Розтяжність	4	0.2	4.4	4.4	4.2	4.2	4.0
Сумарна оцінка за дескрипторами МФВ					4.12	4.72	7.72	4.78	4.2
<i>Підсумкова оцінка за показником МФВ</i>					<i>0.82</i>	<i>0.84</i>	<i>0.94</i>	<i>0.95</i>	<i>0.84</i>
Здатність до формування	0.4	Ступінь виявлення	1	1.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Сумарна оцінка за дескрипторами МФВ					5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
<i>Підсумкова оцінка за показником МФВ</i>					<i>2.0</i>	<i>2.0</i>	<i>2.0</i>	<i>2.0</i>	<i>2.0</i>
Загальна оцінка МФВ					2.82	2.84	2.94	2.95	2.84

За результатами аналізу підтверджено зниження липкості модельних композицій бобових паст ПКВ, ВЦК, МФВ з підвищенням концентрації кокосового масла. Кокосове масло сприяє підвищенню міцності та щільності й поступовому зниженню показників розтяжності.

Результат органолептичного аналізу показників консистенції модельних композицій бобових паст з МССД показав найкращі показники при концентрації кокосового масла 10%. Загальний бал відповідно до розроблених дескрипторів становив 2.98 для ПКВ, 2.92 для ВЦК, 2.95 для МФВ.

З метою підтвердження органолептичних показників проведено експериментальні дослідження впливу концентрації кокосового масла у кількості 4...12% на показники міцності адгезії модельних композицій бобових паст з концентрацією МССД.

Таблиця 6.12

Міцність адгезії ($\omega\alpha$) модельних композицій бобових паст з МССД та кокосовим маслом($n=5, P\leq 0,05$)

Позначення	Зразки з додаванням кокосового масла, %					
	0	4	6	8	10	12
($\omega\alpha$), Н/м ² , МССД 20%	64.4	42.1	35.3	27.9	24.2	23.3
Різниця, %	-	-22.2	-29.1	-36.4	-43.2	-41.1
($\omega\alpha$), Н/м ² , МССД 10%	55.7	37.0	31.5	26.2	22.0	21.8
Різниця, %	-	-18.6	-24.2	-29.5	-33.6	-33.9
($\omega\alpha$), Н/м ² , МССД 30%	73.8	55.5	48.0	39.9	26.2	25.1
Різниця, %	-	-18.3	-30.8	-25.8	-47.6	-48.7

Зі збільшенням концентрації кокосового масла показники міцності адгезії бобових паст знижуються з 64.4 до 23.3 Н/м² при концентрації МССД 20%, з 55.7 до 21.8 Н/м² при концентрації МССД 10%, з 73.8 до 25.2 Н/м² при концентрації МССД 30%. В результаті аналізу закономірностей впливу кокосового масла на міцність адгезії бобових паст з МССД встановлено зниження цього показника до 3 разів в порівнянні з відповідними контрольними зразками. Експериментальні дослідження встановили, що 10% кокосового масла у рецептурному складі бобових паст з МССД дозволяє наблизити міцність адгезії до показників марципанових паст виготовлених за традиційною технологією.

Визначено вплив концентрації кокосового масла на показники відносної деформації модельних композицій бобових паст з МССД. Результатами

досліджень впливу концентрації кокосового масла на деформаційні характеристики модельних композицій бобових паст з МССД подано в таблиці 6.13.

Таблиця 6.13

Деформаційні характеристики модельних композицій бобових паст з МССД та кокосовим маслом ($n=5$; $P \leq 0.05$)

Найменування показника	Позначення		Зразки з додаванням кокосового масла, %					
			0	4	6	8	10	12
Зворотна деформація, 10^{-3}	$\gamma_{зв}$	ПКВ	340.0	325.7	302.9	301.0	287.1	281.4
		ВЦК	358.6	348.6	337.1	328.6	305.2	291.1
		МФВ	334.3	328.1	312.9	305.0	289.1	276.4
Незворотна деформація, 10^{-3}	$\gamma_{нез}$	ПКВ	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9
		ВЦК						
		МФВ						
Загальна деформація, 10^{-3}	$\gamma_{заг}$	ПКВ	352.9	338.6	325.7	319.9	311.0	294.3
		ВЦК	371.4	361.4	350.0	341.4	320.0	300.1
		МФВ	347.1	337.1	315.7	312.9	304.2	277.3

Підвищення концентрації кокосового масла в рецептурному складі бобових паст сприяє поступовому зниженню загальної деформації в цілому на 25–30% в порівнянні з контролем. Незворотна деформація є стабільною для всіх дослідних зразків, не залежить від концентрації МССД і становить 12.9 ум. од. Зворотна деформація знижується паралельно показникам загальної деформації. Відповідно показники зворотної деформації ВЦК знижуються з 358.6 до 291.1 ум. од., ПКВ – з 340.0 до 281.4 ум. од., МФВ – 334.3 – 276.4 ум. од. Одержані дані підтверджують суттєвий вплив кокосового масла на консистенцію бобових паст з МССД.

Особливості впливу кокосового масла на консистенцію бобових паст з МССД і умов для досягнення раціональних реологічних параметрів, можливо прогнозувати за структурно-механічними характеристиками. Уточнення ролі бобових паст з МССД та кокосовим маслом здійснено постановкою обчислювальних експериментів з одержанням відповідних рівнянь регресії для високоеластичного модуля, умовно-миттєвого модуля пружності, піддатливості, в'язкості пружної післядії модельних композицій.

За результатами деформаційних характеристик визначено основні структурно-механічні характеристики по діапазону концентрації кокосового масла. Визначені математичні залежності основних структурно-механічних показників бобових паст з МССД та кокосовим маслом мають вигляд:

- Високоеластичний модуль модельних композицій

$$\text{MSSD 10\% } y=0.0315x^3-0.64x^2-2.1596x+198.11$$

$$\text{при } R^2=0.9998$$

$$\text{MSSD 20\% } y=0.0923x^3-1.5519x^2+0.1525x+190.75$$

$$\text{при } R^2=0.9944$$

$$\text{MSSD 30\% } y=0.1002x^3-1.7972x^2+1.7426x+184.67$$

$$\text{при } R^2=0.9911$$

- Умовно-миттєвий модуль пружності модельних композицій

$$\text{MSSD 10\% } y=-0.00236x^3-0.023x^2-4.196x+317.64$$

$$\text{при } R^2=0.9992$$

$$\text{MSSD 20\% } y=-0.003x^3-0.0656x^2-5.3025x+312.99$$

$$\text{при } R^2=0.9963$$

$$\text{MSSD 30\% } y=0.0528x^3-1.1029x^2+1.0276x+294.54$$

$$\text{при } R^2=0.9929$$

- Піддатливість модельних композицій

$$\text{MSSD 10\% } y=-0.1581x^3+2.0264x^2-11.787x+874.21$$

$$\text{при } R^2=0.9932$$

$$\text{MSSD 20\% } y=0.375x^3-6.3333x^2+11.25x+829.85$$

$$\text{при } R^2=0.9993$$

$$\text{MSSD 30\% } y=0.111x^3-1.9884x^2-3.5323x+817.09$$

$$\text{при } R^2=0.9934$$

- В'язкість пружної післядії модельних композицій

$$\text{MSSD 10\% } y=-0.005x^3+0.041x^2-1.099x+12.46$$

$$\text{при } R^2=0.954$$

$$\text{MSSD 20\% } y=0.0368x^3-0.6149x^2-2.092x+388.15$$

$$\text{при } R^2=0.9992$$

$$\text{MSSD 30\% } y=0.0513x^3-0.9526x^2+0.392x+364.28$$

$$\text{при } R^2=0.9969$$

Графічні залежності високоеластичного модуля та піддатливості модельних композицій бобових паст з МССД та кокосовим маслом подано на рис. 6.10 та рис. 6.11.

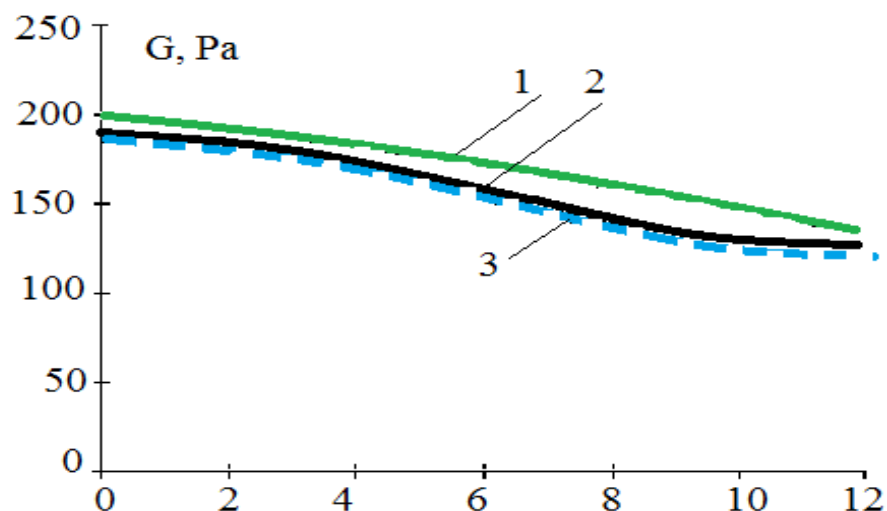


Рис. 6.10. Вискоеластичний модуль модельних композицій бобових паст з МССД та кокосовим маслом: 1-MSSD 10%; 2-MSSD 20%; 3-MSSD 30%

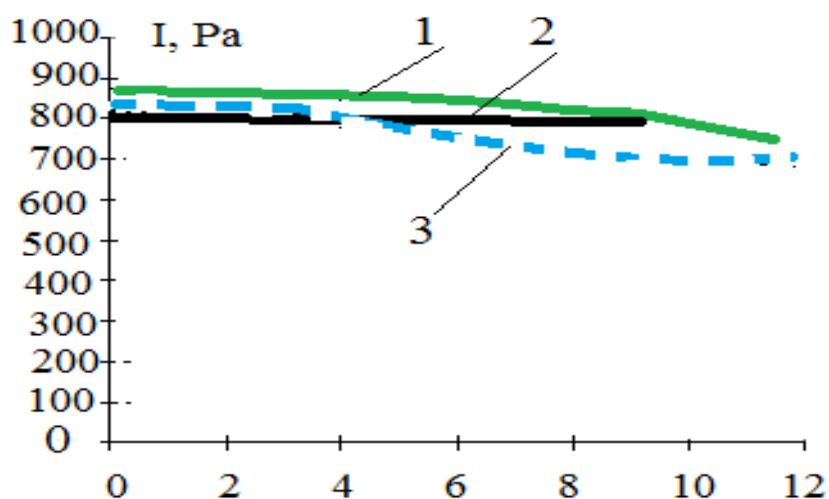


Рис. 6.11. Піддатливість модельних композицій бобових паст з МССД та кокосовим маслом:
1 – MSSD 10%; 2 – MSSD 20%; 3 – MSSD 30%

З підвищенням концентрації кокосового масла знижуються 1.5 рази показники вискоеластичного модуля (G_{el}), що становлять 198.1–134.4 Па для ПКВ, 190.5–128.2 Па для ВЦК, 184.5–120.1 Па для МФВ (рис. 6.10). Встановлено, що у 1.2 рази знижуються: показники модуля пружності (G_{pr}), що становлять 313.2–254.2 Па для ПКВ, 317.7–260.2 Па для ВЦК, 296.3–240.1 Па для МФВ. В'язкості пружної післядії, що становить 381.2...341.1 Па·с для ВЦК, 372.8...338.1 Па·с для ПКВ, 353.5...320.2 Па·с для МФВ, піддатливості (I), що

становить $7.96...7.53 \cdot 10^{-4}$ Па⁻³ для ПКВ, $8.50...7.50 \cdot 10^{-4}$ Па⁻³ для ВЦК, $7.80...6.81 \cdot 10^{-4}$ Па⁻³ для МФВ (рис. 6.11).

При порівнянні з іншими пластичними кондитерськими масами, що використовуються як оздоблювальні напівфабрикати, розроблені бобові пасти мають суттєві переваги. На основі досліджень (Кравченко Рибчук, 2019) встановлено, що енергетична цінність розроблених кондитерських бобових паст у 2.7 раза нижче, ніж у цукрових паст, і в 4.1 рази нижче, ніж у марципанових.

Висновки до шостого розділу

Розроблена технологія кондитерських бобових паст на основі МССД дає змогу отримати високо якісні низькокалорійні оздоблювальні напівфабрикати для кондитерських виробів. Результати дослідження підтверджують їхню високу харчову і біологічну цінність. Поступове зниження показників модульних констант сприяє покращенню формувальної здатності, що забезпечує високу технологічність паст та узгоджується з результатами органолептичного аналізу. Відповідно до результатів попередніх досліджень підтверджено перспективність використання МССД в технологіях бобових паст у концентрації 10...30% та кокосового масла у концентрації 10%. Перспективність дає змогу отримати бажані структурно-механічні властивості для оздоблювальних напівфабрикатів відповідно до напрямку їх технологічного використання.

Список використаної літератури

1. Tamova M. Yu., Shchikarev A. N., Basyuk, A. S. (2015). Trends and innovations of the global confectionery industry. Nauchnye trudy KubGTU, 14, 176–183.
2. Дмитриева А. Н. Макарова Н. В. Анализ состава изделий из марципана: сб. тез. междунар. науч.-практ. конф., г. Магнитогорск, 3–4 марта 2016 г. Магнитогорск, 2016. С. 28–31.
3. Назарова О. Ю., Чуприна О. А. Сучасний стан кондитерського виробництва як сегменту харчової промисловості. Економіка і суспільство. Мукачево: МДУ, 2018. Вип. 16. С. 42–49.
4. Апет Т. К., Пашук З.Н.Справочник технолога кондитерского производства. СПб.: ГИОРД, 2004. 560 с.

5. Способ производства марципановых плиток функционального назначения: пат. 2583090 Россия. № 20150211; заявл. 11.02.2015; опубл. 08.04.2016, Бюл. № 13.
6. Способ производства марципановых плиток: пат. 2616785 Россия. № 2015152421; заявл. 07.12.2015; опубл. 18.04.2017, Бюл. № 11.
7. Dorna G. A., Savenkovab T. V., Sidorovac O. S., Golub O.V. Confectionery goods for healthy diet. *Foods and Raw Materials*. Vol. 3. No. 1. 2015. P. 40–48.
8. Кондитерская смесь для изготовления персипана: пат. 2592109 Россия. № 20150141; заявл. 14.04.2015; опубл. 28.06.2016, Бюл. № 20.
9. Fernandez M. L., Santos M. E. Effects of consuming sweeteners on metabolic disorders. *Journal of Nutrition, Food Research and Technology*. 2018. Vol. 1. Issue 2. P. 34–38.
10. Zeynep F., Sifa T. Determination of the effects of some artificial sweeteners on human peripheral lymphocytes using the comet assay. *Journal of Toxicology and Environmental Health Sciences*. 2014. Vol. 6. Issue 8. P. 147–153.
11. Сирохман І. В., Лозова Т. М. Товарознавство цукру, меду, кондитерських виробів: підручник. Київ: Центр учбової літератури, 2008. 616 с.
12. Способ приготовления кондитерской пасты: пат. 2370087 Россия. № 2008121837; заявл. 27.05.2008; опубл. 20.10.2009, Бюл. № 29.
13. Гуленко Л., Сібілєва Е., Животкевич Л. Рецептури: торти, тістечка бісквітні, перекладенці, рулети. Київ: УКРХЛІБПРОМ, 2013. 600 с.
14. Kravchenko M., Mihailik V., Yakymchuk D., Dzyundzya O., Burak V., Romanenko O., Valko M., Korolenko E., Osypenkova I., Bondarchuk Z. (2019). Research into the structural-mechanical properties of shortbread dough with oilseed meals. Дослідження структурно-механічних властивостей пісочного тіста з олійними шротами. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (11 (99)), 52–59. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.170617>.
15. M. Kravchenko, L. Rybchuk, D. Fedorova, R. Romanenko, V. Piddubnyi, I. Danyliuk, K. Palamarek, T. Marusyak, T. Nezveshchuk-Kohut Determining the rational concentration of drydemineralized whey in a formulation for marzipan pastes, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* ISSN1729-3774/11(103) 2020, 22–33 с.
16. I. Stadnyk, V. Piddubnyi, H. Karpyk, M. Kravchenko, V. Hidzhelitskyi Adhesion effect on environment process injection. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. Vol. 13, 2019, no. 1, p. 429–437. Food safety, tracking and responsibility in the food chain. The 17. European Commission,

- 2005, 48 p European systems on quality and food safety. Available at: <http://www.uropreserses.info/special/aether>.
17. Artyukh T., Cernavka M., Hryhorenko I. The value of a commodity category and marketing. *Competitivitatea și inovarea în economia cunoașterii. Chișinău. Culegere de articole. Chișinău. ASEM. 2018. Vol. 1. P. 52–59.*
 18. Wake W. C. *Adhesion and Formulamion of Adhesives*. London: Applied Seince Publishers, 1982. P. 3.
 19. Дерягин Б. В. Кротова Н. А., Смилга В. П. *Адгезия твердых тел*. М.: Наука, 1973. 279 с.
 20. Зимон А. Д. *Адгезия жидкости и смачивание*. М.: Химия, 1974. С. 7.
 21. Wu Souheng. *Polymer Interface and Adhesion*. New Yonk and Bael: Marcel Dekker. Inc. 1973. P. 19–17.
 22. Ли Л.-Х. *II Адгезив и адгезионные соединения / пер. с англ.* М.: Мир, 1979. С. 360.
 23. Берлин А. А. Басик В. Е. *Основы адгезии полимеров*. М.: Химия, 1974. С. 6.
 24. Вакула В. Л., Притинин Л. М. *Физическая химия адгезии полимеров*. М.: Химия, 1984. С. 12.
 25. Адамсон А. *Физическая химия поверхностей / перевод И. Г. Абидора*. М.: Мир, 1979. 568 с.
 26. Райдил Э.К. *Химия поверхностных явлений / пер. с англ Э. К. Райдил*. М.: ОНТИ, 1936. 421 с.
 27. Fisher L. R. *Measurrement of Small Contact Angles for Sessile Drops*. *J. Col. Inter. Sci.*, 1979, v. 72, № 2, P. 200–205.
 28. Olga Shanina, Ivan Galyasnyj, Tetyana Gavrysh, Kateryna Dugina, Yuriy Sukhenko, Vladyslav Sukhenko, Natalia Miedviedieva, Mikhailo Mushtruk, Tatyana Rozbytska, Natalia Slobodyanyuk *Development of gluten-free non-yeasted dough structure as factor of bread quality formation*. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, vol. 13, 2019, no. 1, p. 971–983. URL: <https://doi.org/10.5219/1201>.
 29. Pat. No. 2592109 RF. *Konditerskaya smes' dlya izgotovleniya persipana* (2015). No. 20150141; declared: 14.04.2015; published: 06.2016, Bul. No. 20.
 30. Tarasenko N. A., Novozhenova, A. D. (2015). Pat. No. 2583090 RF. *Sposob proizvodstva martsipanovyh plitok funktsional'nogo naznacheniya*. No. 20150211; declared: 11.02.2015; published: 11.05.2016, Bul. No. 13.
 31. Maksimenko D. N., Krasin P. S., Tarasenko N. A. (2016). Pat. No. 2632334 RF. *Sposob proizvodstva martsipanovyh izdeliy*.

32. No. 2016127117; declared: 05.07.2016; published: 04.10.2017, Bul. No. 28.
33. Kozlova O. (2014). A Study of Properties of Structure-Stabilizing Agents for Products Based on Dairy Raw Materials. *Foods and Raw Materials*, 2 (2), 16–25. DOI: <https://doi.org/10.12737/5455> Вивчення властивостей структуруючих стабілізуючих речовин для продуктів на основі молочної сировини.
34. Vsemirnaja organizacija zdravoohraneniya. (2015). Global'nye factory riska dlja zdorov'ja: smertnost' i bremja boleznej, obuslovlennye nekotorymi osnovnymi faktorami riska [World Health Organization. Global health risk factors: mortality and disease burden due to some major risk factors]. VOZ: Zheneva. [In Russian].
35. Мазаракі А., Кравченко М. Ф., Демічковська М. П. Mister Bean. Tasty Legume Dishes / заред. А. А. Мазаракі. Київ: Ки їв. нац. торг.-екон.ун-т, 2019. 292 с.
36. Скурихина И. М., Волгарева М. Н. Химический состав пищевых продуктов: 2-е изд. М.: Агропромиздат, 1987. Кн. 1. С. 32–34.
37. Skurikhin I. M. And Volgarev M. N. (1987), Khimicheskiy sostav pishchevych produktov [The chemical composition of food products], Agropromizdat, Moscow, Russia, pp. 32–34.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У першій частині монографії на основі деформаційного та термодинамічного аналізу робочого процесу дії валкових робочих органів на тісто у формувальній машині розкрито, обґрунтовано та створено узагальнені моделі його розкачування й нагнітання. На підставі власних узагальнених теоретичних і експериментальних досліджень виконаних в лабораторних і виробничих умовах, обґрунтовано доцільність в розробленні та одержанні нових важливих результатів, які вирішують актуальну науково-практичну задачу по нагнітання тіста валками із забезпеченням якісних характеристик готової продукції та ефективної роботи формувальної машини. За допомогою розроблених методик можна визначати дійсну продуктивність машини, швидкість течії та величину деформації тіста, температурні перепади та шляхи уникнення, питому потужність з урахуванням тепломасообмінних та реологічних процесів у робочій камері вузла нагнітання для будь-яких співвідношень робочих середовищ.

Виходячи з виконаних теоретичних та експериментальних досліджень, поданих у монографії, можна зробити такі висновки:

1. У результаті аналітичного аналізу робочого процесу виявлено відсутність загального алгоритму врахування структурно-механічних змін середовища, а окремі існуючі підходи базуються на гідродинамічному описі. Проведений аналіз теоретичних і експериментальних результатів у першу чергу встановив, що основними характеристиками машин з валковими робочими органами для забезпечення необхідної і стабільної форми і розмірів виробу є реологічні показники. Дані реологічних показників обробляючого тіста дають підхід до раціонального вирішення виконання технологічного процесу розкачування. На основі цього розкрито фізичну суть процесу формування тіста при дії валків.

2. Відзначено, що одним з основних напрямків конструювання нових форм валкових робочих органів та самого вузла нагнітання формувальної машини є оптимізація деформаційних процесів. Створено узагальнену модель робочого процесу, що дозволяє вирішити декілька задач. По-перше, розділити процес на стадії. При цьому з'являється можливість забезпечити температурний оптимум для кожного з процесів. По-друге, досягати точного контролю температури тіста при протіканні процесу нагнітання. По-третє, досягати точного контролю часу протікання затягувально-стискаючої стадії та, за необхідності, зміни тривалості їх перебігу. При цьому відведення тепла, що

виділяється при нагнітанні (в'язке тертя), дозволяє зменшити витрати сировинних та енергетичних ресурсів. Також відпадає потреба у використанні додаткових витрат матеріалів на виготовлення валків інших конструкцій.

3. Теоретично обґрунтовані способи нагнітання і розкачування тіста валками. Встановлено площа контакту та кут затягування тіста валками, які спрямовані для забезпечення текучості і формоутримувальних властивостей в'язко-пластичного тіста при деформації, які повинні відповідати рівню деформаційного навантаження.

4. Розроблена методика інженерного розрахунку основних параметрів процесу відповідно до фізико-механічних властивостей тіста. Одержані аналітичні залежності зв'язку геометричних параметрів валків з робочою камерою. Встановлено, що їх діаметр повинен перебувати у визначених границях 155...175 мм.

5. Побудовано реологічну модель деформації пружно-в'язко-пластичного тіста при стисканні і одержано її математичний опис.

6. Аналітичний огляд існуючих технологій дозволив визначити перспективи стадій розвитку тіста із використанням ЕКБ при виробництві бубликів. Проаналізовано існуючі підходи щодо удосконалення технології та доведено доцільність використання борошняних сумішей ЕКБ у технології бубликових напівфабрикатів. Такий підхід дозволить зменшити втрати маси напівфабрикату під час випікання та зберігання, стабілізувати технологічний процес, отримати широкий асортимент продукції з високими органолептичними властивостями, збільшити терміни їх зберігання.

7. Дослідження математичної моделі дає можливість стверджувати, що оптимум густини тіста досягається для параметрів $(E, C, B) = (0,5; 0,23; 0,23)$ із високим рівнем точності – 1,4%. Аналіз діаграм ліній рівня параметрів тіста дає усі підстави стверджувати, що вміст інгредієнтів: жир – 18%, цукор – 18%, борошно в.с. – 50% і (ЕКБ) – 14% із точністю: 0,4%, 0,14% та 0,12% відповідно, дозволили розробити рецептуру бубликового тіста.

8. Порівняльний аналіз зміни об'єму стверджує, що можна суттєво впливати на процес нагнітання і так скоротити його тривалість. Тому необхідно в нових конструкціях вузла нагнітання передбачити зменшення деформації, що вплине на зміну структурних властивостей тіста. Дотримання рівня стискання тістової маси при нагнітанні поліпшує якість готових виробів, тобто питомий об'єм максимально збільшився на 22%, пористість – на 4%.

9. Встановлено, що на початковій стадії нагнітання немає великого стискання, тому газова фаза є великою, але цей процес дуже короткий. При

тиску $P = 3.5 \cdot 10^3$ Па до $P = 5 \cdot 10^3$ Па тісто має мало газової фази, що свідчить про його велику густину. Незначному збільшенню об'єму і складу газової фази сприяє збільшення тиску. Тому багаторазове плавне стискання шару тіста сприяє значному насиченню його киснем повітря з відповідною інтенсифікацією окислювальних процесів. Цим, а також збільшенням кількості пор на одиницю площі, можна пояснити посвітління м'якуша бублика, при формуванні напівфабрикату.

ДОДАТКИ

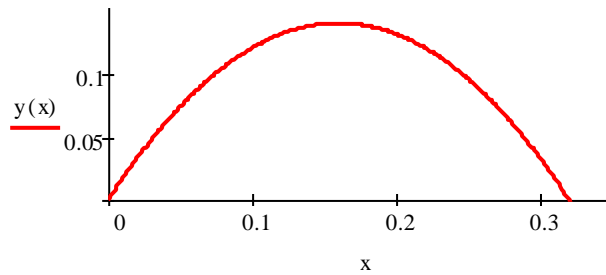
Додаток А

Для трьох випадків досліджено траєкторію руху маси тіста в камері машини:

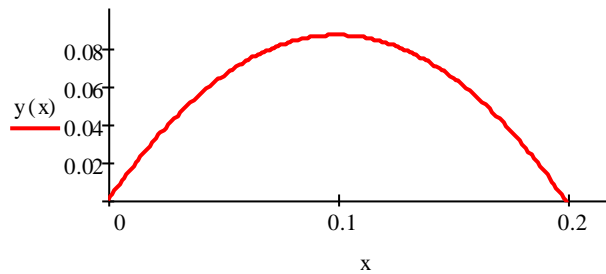
$$v_0 = 0.18 \text{ м/с}$$

$$v_0 = 0.32 \text{ м/с}$$

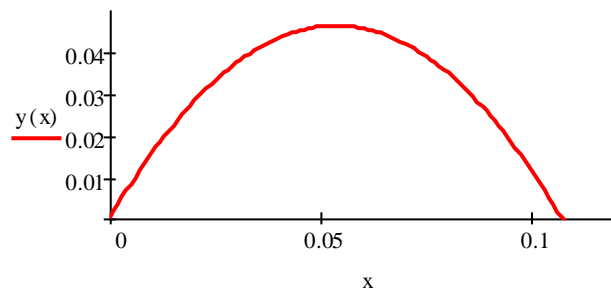
$$v_0 = 0.4 \text{ м/с}$$



а



б



в

Рис.А1. Траєкторії руху маси тіста для трьох початкових швидкостей

а- 0.4 м/с; б- 0.32 м/с; в- 0.18 м/с;

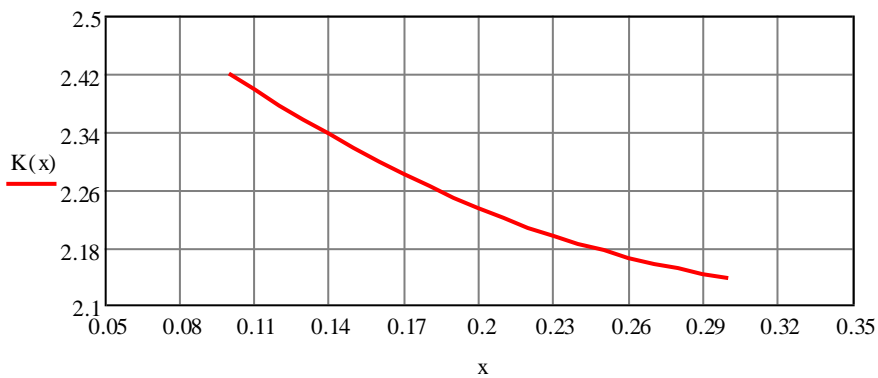
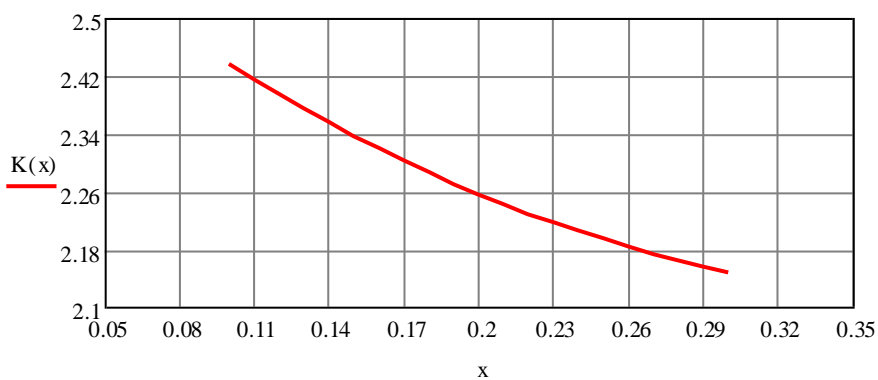
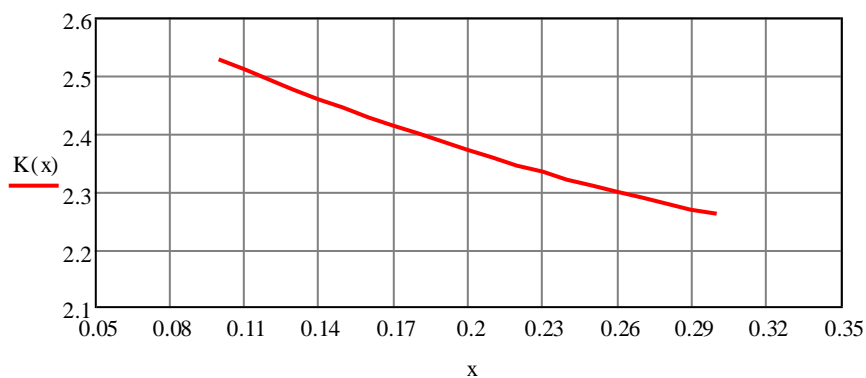


Рис.А2. Графіки функцій $K(x)$ для різних початкових швидкостей

а- 0.4 м/с; б- 0.32 м/с; в- 0.18 м/с;



Малютка

Дрібна

Малютка пісна

Дрібна на соняшниковій олії



ЧОВНИК

Кільця середнього розміру солодкі на смак



Сушка проста

Несолодка, злегка солена



Подільська



**Подільська
з маком**



**Подільська
з кунжутом**

Навчально-методична література

**Стадник І. Я., Піддубний В. А.,
Хареба О. В., Федорів В. М., Підгорний В. В.**

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОТОКИ ПРИ ФОРМУВАННІ БОРОШНЯНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ

Монографія

Формат 60x90/16. Обл. вид. арк. 15,56 Тираж 300 прим. Зам. № 3391.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.
46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4226 від 08.12.11