

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені ІВАНА ПУЛЮЯ

Стадник І. Я., Піддубний В. А.

**ОБҐРУНТУВАННЯ НАГНІТАЛЬНОГО
ПРОЦЕСУ
ФОРМУВАЛЬНИХ МАШИН**

Монографія

**Тернопіль
2020**

Автори:

Стадник І. Я., докт. техн. наук, професор;
Піддубний В. А., докт. тех. наук, професор.

Рецензенти:

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

Схвалено та рекомендовано до друку на засіданні вченої ради
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.
Протокол № 2 від 25 лютого 2020 р.

С 76 Стадник І. Я. Обґрунтування нагнітального процесу формувальних машин :
монографія / Стадник І.Я., Піддубний В.А. – Тернопіль : Тернопільський
національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2020. – 332 с.

ISBN 978-966-305-108-6

УДК 664.65

У другій частині монографії продовжено розгляд обґрунтування раціональних параметрів та конструкційного виконання валкових робочих органів у формувальних машинах й шляхи удосконалення їх роботи. Розглянуто методики проведення експериментальних досліджень та способи обробки отриманих результатів. Проведено аналіз факторів впливу на процес нагнітання валками та їх режимів роботи, на основі чого вибрано найбільш значимі, що визначають динаміку тисків в середовищі з врахуванням дисипативних явищ; динаміку газорідних середовищ за лінійних законів зміни тисків; динаміку газорідної системи за синусоїдального закону зміни тиску.

Основна частина роботи спрямована на розкриття та проектування ефективної роботи валкових робочих органів, системних впливів на спрацювання валкових робочих органів та визначення корозійно-механічного зношування валків і шляхи забезпечення довговічності й надійності машини при проектуванні, виготовленні та експлуатації машин. Подано ґрунтовний аналіз взаємозв'язків між конструктивними, технологічними параметрами та термодинамікою середовищ вузла нагнітання. Проведено теоретичні аспекти механізму формування мікробних біоплівки на поверхні технологічного обладнання та розглянуто чинники, які впливають на мікробну адгезію та формування біоплівки на технологічному обладнанні в харчовій промисловості. Подано сучасні конструктивні й технологічні рішення режимних параметрів валкового вузла нагнітання

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

© Стадник І.Я., Піддубний В.А., 2020

© Тернопільський національний технічний

університет імені Івана Пулюя, 2020

ISBN 978-966-305-108-6

ЗМІСТ

Передмова	7
Вступ	9
РОЗДІЛ 1. НАУКОВІ ПІДХОДИ ДО ТЕХНОЛОГІЇ БУБЛИЧНИХ ВИРОБІВ ІЗ ПШЕНИЧНОГО БОРОШНА	14
1.1. Методологічний підхід до розроблення раціональних технологій виробництва бубликів, що формуються валками	14
1.2. Характеристика процесу та обґрунтування технологічних прийомів, спрямованих на формування заданих властивостей	19
1.2.1. Характеристики бубличного тіста	24
1.2.2. Оцінка динаміки перебігу перехідних процесів при нагнітанні тіста	29
1.2.3. Властивості оптимальних параметрів впливу робочих органів на оброблювання крохмалю	30
1.3. Структура валкових машин та рух в'язкої рідини	32
1.3.1. Дослідження переміщення тіста між обертовими валками	34
1.3.2. Роль механічної енергії у формуванні якості готового продукту	40
1.4. Режими і параметри роботи вузла нагнітання	43
1.4.1. Основні технологічні параметри вузла	43
1.4.2. Визначення геометричних параметрів вузла нагнітання	44
1.4.3. Основні принципи та алгоритм створення даного класу машин	45
Висновки	50
Список використаної літератури	51
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ГАЗОРІДИННИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ ТИСКІВ	53
2.1. Динаміка газорідинних систем в умовах створених тисків обертовими валками	53
2.1.1. Фаза стискання середовища	56
2.1.2. Фаза розширення газорідинного середовища	60
2.2. Динаміка тисків в середовищі з врахуванням дисипативних явищ	62
2.3. Динаміка газорідинних середовищ за лінійних законів зміни тисків ...	70
2.4. Динаміка газорідинної системи за синусоїдального закону зміни тиску .	75
2.5. Планування і постановка обчислювальних експериментів	78
Висновки	100
Список використаної літератури	101

РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ПРОЕКТУВАННЯ ТА КОНСТРУЮВАННЯ ВУЗЛА НАГНІТАННЯ ФОРМУВАЛЬНОЇ МАШИНИ	102
3.1. Основні вимоги ефективної роботи валкових робочих органів при проектуванні	102
3.2. Вплив технологічного середовища на спрацювання валкових робочих органів	107
3.2.1. Аналіз системних впливів на спрацювання валкових робочих органів	108
3.2.2. Визначення корозійно-механічного зношування валків	111
3.3. Напрямки забезпечення довговічності і надійності машини при проектуванні	115
3.3.1. Забезпечення надійності при розробці, виготовленні та експлуатації машин	122
3.4. Методика розрахунку оптимальних параметрів валкового розкачування	125
3.4.1. Визначення швидкості течії тіста в процесі нагнітання	133
3.5. Методика визначення оптимальних параметрів валкового нагнітання	136
3.6. Аналітична модель руху тіста при дії кута захвату валків	145
3.6.1. Визначення характеристик тіста при деформації	149
3.7. Вплив конструктивних параметрів валків на надійність вузла нагнітання тіста при проектуванні	153
3.8. Обґрунтування робочих параметрів валкових робочих органів для в'язкопластичного середовища	160
Висновки	164
Список використаної літератури	166
РОЗДІЛ 4. ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКИ МІЖ КОНСТРУКТИВНИМИ, ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТА ТЕРМОДИНАМІКОЮ СЕРЕДОВИЩ ВУЗЛА НАГНІТАННЯ	169
4.1. Опис матеріальних потоків тіста при нагнітанні	169
4.1.1. Визначення характеристик тіста при деформації	170
4.2. Основні теоретичні положення процесу теплообміну	174
4.2.1. Отримання математичної моделі і критеріального рівняння процесу тепловіддачі	177
4.3. Розподіл температури та її визначення в течії тіста при нагнітанні	180

4.3.1. Математичне моделювання зміни температури в тісті при нагнітанні	185
4.4. Особливості теплообміну в тісті при його нагнітанні обертовими валками	191
4.5. Дослідження температурного поля та властивостей тіста у вузлах нагнітання	202
4.5.1. Визначення температури поверхні валка	204
4.5.2. Визначення властивостей тіста	208
4.6. Рівняння енергетичного балансу. Визначення питомої потужності вузла нагнітання	210
4.7. Визначення корисної потужності при розкачуванні тіста в термінах реологічних параметрів	219
4.8. Визначення впливу параметрів нагнітання тіста на структуру готової бубличної продукції	225
Висновки	230
Список використаної літератури	230
РОЗДІЛ 5. МЕХАНІЗМИ ФОРМУВАННЯ МІКРОБНИХ БІО-ПЛІВОК НА ПОВЕРХНІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	232
5.1. Теоретичні аспекти мікробної адгезії до поверхні	233
5.2. Поняття про мікробну біоплівку, стадії формування біоплівок на технологічному обладнанні	235
5.3. Чинники, які впливають на мікробну адгезію та формування біоплівок на технологічному обладнанні в харчовій промисловості	238
5.3.1. Вплив температури на формування мікробних біоплівок	239
5.3.2 Вплив рН середовища на формування мікробних біоплівок	240
5.3.3. Аналіз шорсткості та чистоти поверхні	241
5.3.4. Вплив гідрофобності на адгезійні властивості	244
5.4. Вплив біоплівки на швидкість корозії робочих поверхонь технологічного устаткування	246
5.4.1. Вплив дефектів робочих поверхонь технологічного обладнання на ефективність санітарної обробки	248
5.5. Формування мікробних біоплівок на нержавіючій сталі з різною шорсткістю поверхні	263
Висновки	250
Список використаної літератури	264

РОЗДІЛ 6. СУЧАСНІ КОНСТРУКТИВНІ Й ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ВАЛКОВОГО ВУЗЛА НАГНІТАННЯ	266
6.1. Особливості конструкцій гвинтових конвейерів для транспортування середовищ	268
6.1.1. Інженерний розрахунок. Визначення геометричних параметрів і частоти його обертання	275
6.1.2. Розрахунок продуктивності шнекових валків	278
6.1.3. Визначення потужності приводу	279
6.1.4. Зменшення маси основних деталей валків	281
6.1.5. Розрахунок шнеків на міцність і жорсткість	283
6.2. Конструкції нових валкових робочих органів	288
6.3. Конструкції нових вузлів нагнітання з валковими робочими органами	299
6.4. Економічна ефективність від впровадження результатів досліджень ...	316
Висновки	321
Список використаної літератури	321
ВИСНОВКИ	324
ДОДАТКИ	327

ПЕРЕДМОВА

Сучасний етап розвитку людства характеризується видатними досягненнями в науці, техніці і технологіях, але разом з тим вирізняється різким погіршенням екологічної ситуації, поповненням середовища існування населення Землі хімічними сполуками, біологічними і фізичними чинниками, у т. ч. з генетичною активністю, суттєвою зміною способу і ритму життя, організації праці, зменшенням фізичної активності, зростанням нервово-емоційних і інформаційних навантажень на фоні зниження якості харчування. Це призводить до поширення цілої низки неінфекційних аліментарних захворювань і світове товариство, оцінюючи таку ситуацію як епідемію і загрозу суспільному розвитку, визнало боротьбу з ними одним із пріоритетів своєї діяльності.

У зв'язку з бурхливим розвитком технології харчових продуктів за останнє десятиліття виробництво кондитерських виробів із борошна примушує науковців спрямовувати свої дослідження на удосконалення, розробку нових форм робочих органів, конструкцій, технологій та методів формування виробів. Друга частина монографії спрямована на розкривання властивостей тіста при дії валкових робочих органів, шляхи санітарної обробки поверхонь обладнання та вплив на них середовища.

Важливим результатом проведених досліджень є зменшення використання фактичного матеріалу та удосконалення описової технології та процесів і, як наслідок – запропоновано конструкції валків та вузлів нагнітання у формувальній машині.

Роль лабораторних та експериментальних досліджень дозволяє і сприяє до зростання використання методик при розробці конструктивних та технологічних параметрів. З числа досліджень довелося виключати такі, що потребують складних устаткувань, довгого часу проведення і підбирати реакції, відповідні новим принципам і новим теоретичним положенням. 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, це пов'язано з необхідністю якомога ширшим і повнішим розкриванням ролі удосконалення робочих органів для виробництва бубличної продукції. Тому за доцільне у монографії наведено

необхідні короткі пояснення природи тих явищ, що спостерігалися під час проведення дослідів.

Вибираючи матеріал для монографії, автори прагнули дати перевірені дослідження за головними чинниками, що цікавлять сучасного фахівця харчових виробництв. На основі викладеного, хочеться висловити думку словами відомого на Тернопіллі науковця, поета, фахівця у промисловості виробництва продукції, професора Володимира Вихруща:

*Головне – не загубити сумління
У русі часу, в буднях суєти,
Як маєш гордість і терпіння,
Тобі усі відкриються світи.*

ВСТУП

Провідними країнами світу обрана стратегія розвитку, принциповим для якої є забезпечення умов для формування та збереження потенціалу здоров'я людини (Health Promotion), що дозволяє протистояти впливу шкідливих чинників оточуючого середовища за рахунок покращання загального стану, адаптаційних властивостей організму, а також впровадження профілактичних заходів щодо неінфекційних аліментарних, «екологічно обумовлених», професійних захворювань. Пріоритетну роль в цій концепції відведено здоровому способу життя і доступності до якісних продуктів харчування зі скоригованими фізіологічними властивостями, зокрема здатними коректувати процеси метаболізму в організмі людини, підвищувати його захисні властивості за рахунок посилення загальнозміцнювальної, імуномодельючої, антитоксичної, антиоксидантної, антимуtagenної та інших дій.

Продукти харчування – один із найбільш важливих і динамічних факторів взаємозв'язку людини з навколишнім середовищем. Вони не тільки забезпечують організм людини енергією та необхідні для протікання пластичних процесів, також є джерелом сполук з біорегуляторними та захисними властивостями, засобом своєчасного реагування і підвищення його резистентності до негативних впливів оточуючого середовища. У формуванні підвищених адаптаційних можливостей організму людини роль продуктів харчування полягає у покращенні стану і функціонування органів і систем. Надзвичайно важливими є складові раціонів, здатні запобігати мутаціям генному клітин, які лежать в основі онкологічних захворювань та спадкових, вроджених патологій, за рахунок зниження депонування та прискорення виведення канцерогенів і мутагенів з організму людини.

Особливе значення належить хлібобулочним виробам, які за масовістю і постійністю споживання, природним потенціалом у коректуванні харчового статусу, покращенні здоров'я нації займають лідируючі позиції серед продуктів харчування. Тому якість борошняних виробів, його ціна, фізіологічні властивості, безпечність, вміст потенційно шкідливих речовин, асортимент, об'єми випуску, проблеми, що супроводжують виробництво, знаходяться в центрі постійної уваги не тільки фахівців хлібопекарської та кондитерської галузей, а і є об'єктом підвищеного контролю з боку населення, органів державної

влади та засобів масової інформації. Розуміння значення харчування в житті людини з урахуванням національних традицій:

- перетворенні окремих компонентів їжі у структурі тіла, їх вплив на діяльність органів і систем організму;

- вивченні складу і властивостей, харчової цінності (ХЦ) продуктів, насамперед масового споживання, їх профілактичного і оздоровчого потенціалу;

- пошуку і дослідженні 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;

- розробці технологій виробів з необхідними фізіологічними властивостями за рахунок удосконалення рецептур, методів та режимів обробки сировини, технологічних та конструктивних параметрів виробництва, що забезпечить збереженість цінних харчових речовин та БАР, формування звичних споживчих характеристик, високої біозасвоюваності та безпечності продукції.

Задачею таких заходів є розширення асортименту, збільшення об'ємів випуску продукції, насамперед масового споживання, зі скоригованими фізіологічними властивостями та ХЦ, що дозволить запропонувати ефективні заходи по покращенню якості та корекції харчового статусу українців [62, 76 – 89, 94 – 110]. Це є одним із домінуючих напрямків здоров'я зберігаючої стратегії розвитку суспільства і медицини, обов'язковою передумовою охорони і зміцнення здоров'я нації.

Хліб є одним з найвидатніших відкриттів в історії людства. Він існує тисячі років.

Вчені вважають, що людина почала вживати зерна злакових ще в часи «мезоліту» (15 тис. років тому). З тих часів і починає свою історію хліб. Приблизно 6–8 тис. років тому люди навчилися подрібнювати злаки, почали готувати з них каші, з яких пізніше на розпеченому камінні пекли прісні коржі. Як стверджують археологи, ці каші й були прашурами сучасного хліба.

Минуло ще кілька тисячоліть, і люди навчилися готувати хліб із зброженого тіста. Вважається, що вперше такий хліб почали виготовляти у Єгипті 5–6 тисячоліть тому. Вважається, що самий давній хліб знайдено єгиптологами в гробниці фараона Рамзеса III. Йому понад 4600 років. Поряд з цим є відомості, що у Швейцарському Національному музеї в м. Цюріху

зберігається круглий хлібець, знайдений археологами під час розкопок на дні озера, що виникло. Його вік – 6000 років.

Стародавній єгипетський художник на стіні усипальниці фараона відтворив картину виготовлення хліба: єгиптяни збирають зерно, мелють його, місять тісто, виготовляють з нього хліб різної форми. До наших часів дійшла статуетка тістоміса тих часів, яка зберігається в музеї м. Гізи (Єгипет) і відображає операцію замішування тіста в ті часи.

Саме у Єгипті були поєднані в один процес три великих відкриття давнини: вирощування пшениці, застосування жорен для помелу зерна і використання мікроорганізмів для розпушення тіста, які започаткували технологію виготовлення хліба. Так був створений хліб, обрис якого не змінюється вже протягом 5 тисячоліть.

Мистецтво випікати хліб зі зброженого тіста перейшло до Греції, а звідти – у Рим і деякі інші європейські країни.

Як вважає багато вчених, слово «хліб» походить від грецького слова «клібанос» – горщик спеціальної форми, в якому грецькі майстри випікали хліб.

Значний розвиток хлібопечення знайшло у древньому Римі, де майстерність пекаря цінувалась дуже високо. У Римі встановлено єдиний у світі пам'ятник пекарю Вергілію Еврісаку (30 століття до н.е.).

У 776 році на перших олімпійських іграх гостей пригощали білим хлібом з маслинами та рибою.



В Україні хліб знайшли в будовах Трипільської культури, що існувала 3 тисячоліття тому. Були знайдені останки глинобитних будинків з кількома

приміщеннями. Частина кімнат використовувалась для житла, а решта служили коморами для запасів зерна та інших продуктів. У кожній кімнаті будувалась жарова піч для випікання хліба. Тут знаходились великі глиняні посудини для зберігання зерна і зернотерки. Ефективним способом формування заданих фізіологічних властивостей є також регулювання перебігу біохімічних, мікробіологічних процесів в ході приготування бубличної продукції, шляхом зміни умов середовища і відповідно активності бродильної мікрофлори, використання штамів молочнокислих бактерій (МКБ) і дріжджів з властивостями, що забезпечують в достатній мірі виконання технологічних задач розпушення, накопичення широкого спектру смакових і ароматичних сполук, речовин з бактерицидною дією, а також здатних синтезувати низку вітамінів, макро-, мікро-елементів, органічних кислот, що в комплексі підвищує якість продукції, мікробіологічну стабільність при зберіганні, ХЦ, біодоступність складових, посилює позитивний вплив на роботу ШКТ, печінки, збудження апетиту, секрецію травних соків, біозасвоюваність їжі тощо [21–23].

Отже, харчування завжди було, є і буде важливою стороною нашого буття. Недаремно ще давні греки однією з муз, без якої не мали свого існування, вибрали Куліну – покровительку мистецтва готування їжі. Адже виробництво бубликів – це мистецтво, яке невід’ємно та важливо відіграє роль у самобутності народу. Створені ним рецептури не випадкові, вони мають відбиток тієї чи іншої епохи і культури, що еволюціонує протягом віків, і дає нам чудові взірці правильного поєднання продуктів не тільки до смаку, а й з фізіологічної точки зору.

Інноваційний динамічний розвиток хлібопекарської галузі можливий лише за умови забезпечення балансу формування всіх критеріїв якості продукції з позицій споживачів, нутриціологів і виробників. В свою чергу, розробка технологій та обладнання для формування бубличної продукції підвищеної ХЦ, з актуальними в сучасному світі фізіологічними властивостями, впровадження заходів по економії ресурсів при здатності задовольнити психологічні та фізіологічні потреби споживачів можливе лише за умови якісної роботи технологічного обладнання. Це потребує розуміння важливості кожного із критеріїв від формування органолептичних, фізико-хімічних, мікробіологічних показників якості, хімічного складу, ХЦ і біохімічних характеристик готової продукції, врахування комплексності, багатогранності і взаємозв’язку чинників,

що обумовлюють і забезпечують їх при механічній дії робочих органів технологічного обладнання.

Бубличні (БВ) за рахунок постійності споживання всіма верствами населення, особливостей технології, хімічного складу, біохімічних характеристик сировини є продуктами з високим природним потенціалом у коректуванні харчового статусу українців. Тому зусилля вітчизняних науковців та виробників, як і у всьому світі, спрямовуються на удосконалення обладнання та асортиментної політики підприємств галузі, розробку і впровадження технологій БВ покращеної харчової цінності, зі скоригованими фізіологічними властивостями. Зростають вимоги й до безпечності продукції, вмісту синтетичних добавок та алергенів, пріоритети споживачів зміщуються до смачних й ароматних виробів, отриманих за класичними технологіями без застосування поліпшувачів. Більш того, для вітчизняних підприємств, приготування бубликів на яких характеризується високими витратами енергії, матеріальних, трудових ресурсів, при диспаритеті зростання цін на складові собівартості та продукцію, а також при коливаннях якості сировини та інших проблемах, що ускладнюють їх роботу, надзвичайно важливим є питання підвищення конкурентоспроможності БВ, ресурсозбереження, технологічної ефективності та інвестиційної привабливості виробництва.

У зв'язку з цим є актуальним продовження розкриття теоретичного підґрунтя і конструктивних та технологічних рішень по обґрунтуванню шляхів конструктивної розробки вузла нагнітання формувальної машини для коригування характеристик борошняних систем і регулювання процесів формування якості продукції. Важливими є нормування основних ознак та розробка заходів, спрямованих на формування заданих функціонально-технологічних властивостей продукції.

На завершення загального оглядового напрямку другої частини монографії, що дозволить ознайомитись з дослідженнями та патентним оглядом розробок робочих органів вузла нагнітання формувальної машини, хочемо завершити словами професора Володимира Вихруца:

*Людських стремлінь пливуть могутні ріки,
лиш добродійством наповняй засіки.*

Все те, що людям обіцяв – зроби, інакше рейтинг твій впаде навіки.

РОЗДІЛ 1

НАУКОВІ ПІДХОДИ ДО ТЕХНОЛОГІЇ

БУБЛИЧНИХ ВИРОБІВ ІЗ ПШЕНИЧНОГО БОРОШНА

Аналіз показників стану здоров'я, умов життя і харчового статусу українців, основних причин їх негативних змін, виняткової значимості, потужного оздоровчого й профілактичного потенціалу бубликових виробів (БВ), а також проблем, що супроводжують їх виробництво, вказує на доцільність активізації досліджень у напрямку розробки заходів з покращення якості, конкурентоспроможності продукції, підвищення їх харчової цінності (ХЦ) і коригування фізіологічної дії. Актуальні пошук і дослідження нових джерел дії на тісто при формуванні продукції із забезпеченням поживних речовин з високою реакційною здатністю забезпечувати формування фізіологічних властивостей, а також здатність чинити спрямований вплив на реологічні, біотехнологічні характеристики напівфабрикатів та якість БВ.

Вибір та обґрунтування виду механічної дії, напрямків її використання при виготовленні продукту споживання, яким є бублик, потребує комплексного оцінювання за наступними критеріями:

- 1) безпечність, рівень потенційних ризиків для здоров'я людини, відсутність побічних ефектів при постійному надходженні в організм;
- 2) достатня сировинна база, наявність вітчизняного продукту стандартної якості;
- 3) технологічні властивості, хімічний склад, органолептичні, фізичні, мікробіологічні характеристики, досвід і ефективність використання у харчовій промисловості.

1.1. Методологічний підхід до розроблення раціональних технологій виробництва бубликів, що формуються валками

Враховуючи напрями технологічного прогресу в харчовій промисловості, що визначаються зокрема, державною політикою в галузі здорового харчування, економічними та соціальними змінами у суспільстві, новими технологічними можливостями та конкуренцією на продовольчому ринку, виникає потреба в удосконаленні машин та технологій традиційної харчової продукції. Крім цього потрібно робити пошук у створенні машин нового покоління, що відповідають сучасним вимогам та готової продукції збагаченої важливими нутрієнтами та із

подовженим терміном зберігання. Тісто є основою чи складовою частиною багатьох борошняних кондитерських виробів, а значний попит населення на ці вироби дозволяє вважати їх важливими продуктами харчування.

Недоліком борошняних кондитерських виробів, в яких як основа використовується напівфабрикат, є короткий термін реалізації та зберігання. Структурно-механічні властивості м'якуша, значною мірою залежать від перерозподілу вологи в напівфабрикаті і є важливими показниками для споживача, що свідчать про ступінь свіжості виробу. В процесі зберігання одночасно з змінами структурно-механічних властивостей м'якуша змінюється його смак та аромат – що також є важливими споживчими характеристиками. На структурно-механічні властивості, смак та аромат впливає якість сировини, що входить до складу рецептури бублика. Використання інгредієнтів рослинного походження, зокрема нетрадиційних видів борошна, які могли б попередити черствіння може вважатися перспективною розробкою, що цікавитиме виробників кондитерських виробів [4].

У світі останнім часом постійно проводяться роботи з розроблення та вдосконалення технологічних ліній для виробництва бубликових виробів, що складаються з кількох кондитерських напівфабрикатів із різними смаками. При створенні обладнання для їх формування перевага віддається методу нагнітання, що дає можливість інтенсифікувати виробничий процес та отримати різноманітний асортимент виробів. Тому розроблення вітчизняних технологій конкурентоспроможних борошняних кондитерських виробів та рекомендацій зі створення обладнання для їх механізованого виробництва при формуванні методом нагнітання валками є актуальною проблемою для кондитерської галузі.

Виробництво кожного бубликового виробу – складний, багатофакторний процес, який слід розглядати як велику централізовану систему, що складається з декількох підсистем [1–3]. У зв'язку з цим методологічний підхід до розроблення раціональних технологій кондитерських виробів повинен базуватися на системному аналізі процесів на макро- та мікрорівнях у межах кожної підсистеми.

При організації комплексно-механізованого виробництва бубликів центром технологічної системи є підсистема їх формування. Технологічні параметри процесу формування взаємозв'язані зі структурно-механічними властивостями напівфабрикатів і, відповідно, впливатиме на їх рецептурний склад та технологію приготування.

При розробленні технологій нових кондитерських мас структурні

властивості напівфабрикатів обумовлюють вибір формувального обладнання або вимоги до створення нового. Тобто, вихідні параметри підсистем приготування тіста будуть впливати на параметри функціонування підсистеми формоутворення і, таким чином, технологічні системи будуть мати дві центральні підсистеми: приготування напівфабрикатів тіста й виробу та їх формоутворення.

За результатами аналізу формувального обладнання, що експлуатується на підприємствах України у виробництві бубликових виробів, було встановлено, що виробниками використовується переважно машину Б4-58. Слід зазначити, що дане формуюче обладнання, яке випускає промисловість сьогодні, відрізняється за конструктивним виконанням, але найбільш поширеними моделями є нагнітальна камера з валковим нагнітанням за типом «валки-валки».

Дослідженнями було встановлено [4], що при формуванні продуктивність обладнання обмежується критичною швидкістю зсуву, при досягненні якої спостерігаються процеси нестійкої течії маси в каналі між валками: шорсткість поверхні, пульсація джгутів та коливання їх діаметру, що негативно впливає на якість виробів:

$$v_k = Q_v \cdot 2(2n+1) / (n \cdot \pi \cdot d_0 \cdot \delta^2),$$

де v_k – критична швидкість зсуву, c^{-1} ;

Q_v – об'ємні витрати напівфабрикату, що відповідають прояву нестійкої течії, m^3/c ;

n – індекс течії;

δ – товщина кільцевої щілини, м;

d_0 – діаметр матриці, м.

Отже, збільшенню продуктивності та забезпеченню якості сформованих напівфабрикатів сприятиме збільшення індексу течії тіста, що необхідно враховувати при створенні нових видів виробів.

Домінуючим фактором при формуванні структури напівфабрикатів для бубликових виробів є пластична та адгезійна міцність, індекс форми, індекс течії, що мають створюватися з урахуванням конструктивних особливостей обладнання (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Діапазон структурно-механічних характеристик напівфабрикатів

Тип моделі нагнітання	Напівфабрикат	Пластична міцність, кПа		Адгезійна міцність, кПа		Індекс форми	
		min	max	min	max	min	max
За типом: «валки – валки»	здобне пісочне тісто	1,6	2,4	1,1	1,8	0,65	0,75
	пряникове тісто, буликове тісто	1,8	2,6	1,6	1,8	0,65	0,75

Залежно від структурних властивостей напівфабрикатів, вироби можуть складатися з двох капілярно-пористих тіл (двокольорове здобне пісочне печиво), капілярно-пористого тіла та колоїдного тіла (тісто для здобного печива – фруктова начинка), з колоїдного капілярно-пористого тіла та колоїдного тіла (пряниковий напівфабрикат з фруктовою начинкою), з двох колоїдних капілярно-пористих тіл (кремово-збивні цукерки з комбінованими корпусами). За аналогією теорії стійкості дисперсних систем [5] нами запропоновано теоретичну модель агрегативної стійкості комбінованої системи, що складається з напівфабрикатів з різної структурою, з урахуванням кінематичного, гідродинамічного та термодинамічного факторів (рис. 1.1).

Стосовно до моделі, кінематичний фактор стійкості визначатиме структурно-механічні властивості напівфабрикатів з урахуванням вимог до формування методом нагнітання; гідродинамічний – кількість та форми зв'язку вологи, які впливатимуть на агрегативну стійкість системи як у процесі формування, так і в процесі термообробки тістових заготовок.

Під дією ентропійного фактора в комбінованій системі має відбуватися вирівнювання концентрації дисперсійних середовищ з різною масовою часткою вологи, тому термодинамічні фактори відіграватимуть вирішальну роль при утворенні граничного шару на межі розділу напівфабрикатів з різною структурою та впливатимуть на процеси, що відбуваються при зберіганні кондитерських виробів.

Найбільш інтенсивно дифузійні процеси відбуватимуться між шарами з різним вмістом вільної вологи. Для встановлення рівноважного вологовмісту вільна волога буде рухатися з напівфабрикату, що має високу активність води, до ділянок з низьким значенням даного показника. Щоб попередити небажані

міграційні процеси, показник активності води напівфабрикатів комбінованих кондитерських має бути близьким за значенням.

Дослідженнями встановлено [6], що найінтенсивніше внутрішня дифузія вологи відбувається у граничному шарі між напівфабрикатами з різною масовою часткою вологи та залежатиме від градієнтів вологопровідності і термовологопровідності. При збільшенні в'язкості дисперсійного середовища та кількості зв'язаної вологи у напівфабрикатах швидкість міграційних процесів зменшується.



Рис. 1.1. Фактори, що обумовлюють створення агрегативно стійкої системи

Підвищенню агрегативної стійкості дисперсних систем буде сприяти утворення прошарків дисперсійного середовища з певними в'язко-пружно-пластичними властивостями завдяки зміні форми течії тіста при застосуванні конструктивних параметрів вузла нагнітання.

При науковому обґрунтуванні та розробленні раціональних технологій

кондитерських виробів було вирішено ряд взаємопов'язаних завдань: створення нового вузла нагнітання з валковими робочими органами, забезпечення ефективності технологічного процесу та умов для його максимальної механізації. Підвищення конкурентоспроможності виробу при дії нового вузла досягається внаслідок покращення смаку, аромату, структури виробів шляхом гармонійного підвищення харчової цінності, зниження калорійності, зменшення собівартості виробів та дотримання показників якості протягом гарантованого терміну зберігання.

Підвищення ефективності нових технологій досягнуто встановленням оптимальних технологічних режимів на всіх стадіях виробництва бубликових виробів при максимальній інтенсифікації процесів. Дослідження та розроблення раціональних режимів процесів технологічних систем виробництва були спрямовані на забезпечення можливості максимальної механізації виробничого процесу й обґрунтування технологічних вимог до створення обладнання для їх виробництва.

Експериментальні дослідження [4] та впровадження наукових розробок проводили у два етапи: на першому – створювали нові технології з урахуванням конструктивних особливостей обладнання; на другому – на підставі одержаних технологічних і технічних рішень, розробляли нові технології напівфабрикатів та рекомендації до модернізації обладнання або створення нового. При використанні даного підходу розроблені нові раціональні технології та знайдено нові рішення до розроблення обладнання, які захищені 18 патентами України.

Таким чином, завдяки новому методологічному підходу до формування напівфабрикату були обґрунтовані оптимальні параметри процесів технологічних систем виробництва виробів при створенні агрегативно стійких комбінованих структур для борошняних мас. Дослідження у цьому напрямку викладені в даній монографії, що є продовженням першої частини. Подано визначені оптимальні технологічні параметри та дано обґрунтування технологічних вимог до створення нових моделей сучасного вітчизняного валкового формувального обладнання.

1.2. Характеристика процесу та обґрунтування технологічних прийомів, спрямованих на формування заданих властивостей

Більшість технологічних процесів харчових виробництв протікає при гідродинамічній та тепловій обробці продукту. Причому організація цих процесів при відповідних режимах виробництв визначає і органолептичні

показники готової продукції, і витрати енергії на її переробку, і продуктивність апаратів. Отримання в результаті замісу пшеничного тіста з оптимальними складом і реологічними характеристиками та його формування є лише одним із перших кроків у приготуванні якісної бубличної продукції. Не менш важливим є правильна організація, пошук способів удосконалення механічних впливів на стадії дозрівання тіста. До основних задач відносять формування оптимальних біотехнологічних, реологічних та інших характеристик тіста при мінімізації витрат часу, енергії, матеріальних ресурсів. При цьому основними чинниками формування та важелями впливу вважають:

- вміст біомаси та активність бродильної мікрофлори, що є гарантом інтенсивного розпушення і збільшення в об'ємі тістових заготовок;

- баланс фізичних властивостей, які забезпечують газо- та формоутримувальну здатність заготовок;

- глибина фізичних, хімічних, колоїдних, біохімічних і мікробіологічних перетворень біополімерів як основного чиннику впливу на якість і швидкість черствіння продукції;

- концентрація і спектр речовин, обумовлюючих смак і аромат виробів, сполук з антимікробними властивостями, що є передумовою стабільності продукції при зберіганні.

Лише за умови комплексного вирішення цих задач можна прогнозувати підвищення якості продукції, її споживчих характеристик, ХЦ, фізіологічних властивостей, біозасвоюваності нутрієнтів і БАР, безпечності, стабільності при зберіганні і конкурентоздатності. Саме під час дозрівання тіста в результаті перебігу комплексу взаємопов'язаних колоїдних, фізико-хімічних, біохімічних, мікробіологічних процесів великою мірою відбувається формування якості продукції [7, 8, 9, 10, 11, 12].

При цьому одними з найбільш складних, важливих і дискусійних питань у технології виробництва бубликів залишаються теоретичні основи приготування пшеничного тіста, чинники, механізми і особливості формування його структури, способи надання та стабілізації заданих властивостей в динамічних умовах виробництва.

Тісто за сучасними уявленнями є практично унікальною мобільною, полікомпонентною, гетерогенною, полідисперсною, живою біологічною системою з вмістом твердої, рідкої і газоподібної фаз, з динамічною внутрішньою структурою та специфічними реологічними властивостями, складові якої знаходяться в постійній взаємодії. Його приготування включає стадії замішування і дозрівання.

Основне завдання замісу тіста полягає в отриманні із окремих інгредієнтів з різними агрегатним станом, хімічним складом, фізико-хімічними, структурно-механічними, технологічними властивостями, мікробіологічними показниками однорідної системи з заданою внутрішньою структурою і специфічними реологічними характеристиками, вмістом технологічно значимих речовин, ферментів, дріжджових клітин і молочнокислих бактерій, що в комплексі необхідно для забезпечення перебігу його дозрівання та всіх наступних стадій виробництва і формування якості продукції [7, 8, 9, 13, 14, 15, 16].

Вирішальну роль в утворенні безперервної, зв'язаної компактної, пружної, в'язко-еластичної маси пшеничного тіста під час замішування відводять білково-протеїназному комплексу борошна, його змінам в результаті контакту глютену з водою, взаємодії з іншими біополімерами, трансформаціям будови і властивостей під час перебігу складних взаємопов'язаних фізико-механічних, колоїдних, біохімічних, хімічних процесів [7, 8, 9, 13, 14, 15, 16]. Уявлення про склад клейковини, гіпотетичні моделі її молекулярної структури будувались і активно розвивались з кінця ХІХ століття і до сьогодні [17, 18]. Проте концепції розуміння фізичного стану білків в пшеничному тісті, питання будови, механізмів утворення глютену, вмісту, комбінації, оптимальних співвідношень, природи взаємодій між поліпептидними фракціями та іншими складовими борошняних систем, ролі та домінування окремих чинників у формуванні структури, важелів та способів регулювання властивостей і сьогодні привертають увагу науковців в галузях виробництва борошна та виробів, являються обов'язковим кроком в розробці заходів по стабілізації, покращенню якості продукції [12, 17, 18].

Для характеристики клейковини, опису механізмів її конформаційних змін, мобільності властивостей в процесі гідратації та замісу тіста Shewry P.R., Belton P. запропоновано модель «ланцюга і петлі». За молекулярну основу будови клейко-вини, її поведінки при приготуванні тіста в цій моделі обрано те, що повторювані структури поліпептидних ланцюгів глютенінів, насамперед ВМСО, в умовах замісу завдяки описаному вище амінокислотному складу та еластичності здатні утворювати численні петлі і вигини, паралельні і антипаралельні структури у вигляді складчастих листків за рахунок, перш за все, інтер- та інтрамолекулярних взаємодій і появи водневих зв'язків. При цьому короткі неповторювані області доменів, які знаходяться у глобулярній формі з гідрофобним ядром та концентруванням – SH груп на поверхні глобул, забезпечують утворення міжмолекулярних дисульфідних зв'язків, формування безперервної конформації, еластичного «хребта» в результаті окисних процесів.

За рахунок насамперед міжмолекулярних дисульфідних та водневих зв'язків між ВМСО, а також НМСО створюються ансамблі, які є основою клейковинних полімерів, забезпечують формування пружності й еластичності. Гліадини, в свою чергу, взаємодіють з полімерами глютеніну в основному завдяки водневим зв'язкам, силам гідрофобної та іонної взаємодії, надаючи системі в'язкості і розтяжності [8, 19, 20, 21].

Після оптимальної дії робочих органів на утворення та формування заготовок із пшеничного тіста, воно повинно характеризуватися заданими структурно-механічними властивостями, співвідношенням і складом твердої і рідкої фаз, необхідними кількісними і якісними характеристиками безперервного клейковинного каркасу, що огортає крохмальні зерна, інші структурні компоненти. Під час даних операцій у пшеничного тіста продовжуються фізико-хімічні, колоїдні, ферментативні перетворення біополімерів і БАР, що почалися під час його замішування, та протікають біохімічні, мікробіологічні процеси [8, 9, 18, 22].

В процесі тістоутворення та його формування на заготовки, змінюються його реологічні властивості, співвідношення пружності, еластичності, розтяжності, в'язкості, адгезійні характеристики. Тісто в результаті життєдіяльності мікрофлори розрихлюється, збільшується в об'ємі, клейковинні плівки розтягуються, піддаються впливу ферментів сировини, у т. ч. складних ферментних систем дріжджів, дії продуктів їх метаболізму. Продовжуються процеси вбирання води, набухання зерен крохмалю, білків, часткова їх пептизація і дезагрегація в результаті колоїдних, біохімічних та механічних перетворень, змінюються співвідношення, склад та фізичні характеристики твердої і рідкої фаз.

Надважливими при дозріванні тіста є мікробіологічні процеси – спиртове і молочнокисле бродіння. Їх інтенсивність обумовлюється як біотехнологічними властивостями бродильної мікрофлори, так і хімічним складом, умовами борошняного середовища, концентрацією поживних речовин і біостимуляторів, які, в свою чергу, залежать від рецептури напівфабрикатів, швидкості і направленості перебігу в них колоїдних, біохімічних і фізико-хімічних процесів [7, 8, 9, 18, 22]. Якість дріжджів, їх вплив на раціональний хід технологічного процесу виробництва бубликів, економічність бродіння та споживчі характеристики визначається біологічною активністю дріжджів, швидкістю їх розмноження, метаболізму і здатністю адаптуватись до анаеробних умов в напівфабрикатах. Дріжджові клітини достатньо вимогливі до складу поживного середовища, його фізико-хімічних характеристик – потребують

широкий перелік розчинених у воді речовин, що є джерелами азоту, вуглецю, біогенних сполук і олігобіогенних елементів, біостимуляторів. Тому механічні впливи на тісто мають бути такими, щоб забезпечити раціональні умови виконання процесів.

Основними пріоритетами при удосконаленні стадії дозрівання тіста на підприємствах хлібопекарської та кондитерської галузі в останні десятиліття стало прагнення до покращання економічних показників виробництва за рахунок зменшення виробничих витрат, підвищення виходу продукції за рахунок перш за все спрощення ведення, скорочення тривалості технологічного процесу, кількості задіяного обладнання та робочого персоналу. Інтенсивні технології почали активно впроваджуватися на вітчизняних хлібозаводах та фабриках при виробництві кондитерської борошняної продукції. Але суттєвими негативними чинниками прискорених технологій в цілому є поширення проблем зі споживчими властивостями БВ, невираженим їх смаком, ароматом, швидким черствінням, частими випадками мікробіологічного псування, зниженням безпечності, фізіологічних характеристик продукції, що пов'язують саме з нераціональним веденням дозрівання тіста [7, 8, 21]. Крім того, створювані в пшеничному тісті умови за хімічним складом, фізичними характеристиками, параметрами ведення при безопарному його приготуванні не відповідають потребам бродильної мікрофлори, що і ускладнює формування якості бублика. Тому до числа надзвичайно важливих і актуальних задач галузей для покращення якості продукції відносять пошук механічних джерел, які дозволять своїм якісним впливом на тісто створити більш повноцінну, збалансовану за вмістом поживних, біогенних речовин та олігобіогенних елементів, формування необхідних біотехнологічних характеристик напівфабрикатів при економії часу, витрат матеріальних, енергетичних ресурсів. Для прискорення підготовки борошняного середовища, в свою чергу, досліджуються способи його біомодифікації, використання додаткових джерел гідролітичних ферментів, їх активаторів, що посилює розщеплення високомолекулярних сполук, зокрема крохмалю та білків [7, 9, 17].

Отже, основним показником якості процесу є харчова цінність продукту. Але формалізація поняття якості харчового продукту при моделюванні є досить складною задачею. Якість харчового продукту чисельно оцінюється методами кваліметрії і характеризується як результат динамічного поєднання окремих властивостей, кожна з яких може мати різну значимість. Однак, нестабільність показників сировини тваринного і рослинного походження (м'ясо, риби, зерна, овочів, фруктів, та ін.) та деякий суб'єктивізм в органолептичних оцінках

(особливо зовнішнього вигляду, смаку, запаху) не дозволяє встановити загальноприйняті кількісні зв'язки між показниками харчової і товарної якості продукту, властивостями сировини і різними параметрами технологічного процесу. Тому, основним кількісним показником процесу гідродинамічної обробки тіста залишається механічний вплив робочих органів та конструкція робочої камери.

Практично будь-яка технологія харчового виробництва в тій чи іншій мірі визначається процесами підведення механічних впливів робочих органів. Саме тому раціональний режим гідродинамики руху середовища зменшує, а іноді практично виключає можливість виникнення бактеріальних і ферментативних змін в продукті. Розуміння рівня механічного впливу робочих органів на перебіг хімічних реакцій в середовищі дає можливість ефективного управління процесами при зберіганні або виробництві продукту. Правильна оцінка енергії інактивації ферментів і енергії руйнування мікроорганізмів дозволила розробити сучасні промислові способи замішування тіста, засновані на короткочасній обробці продукту при підвищених обертах робочих органів.

1.2.1. Характеристики бубличного тіста

З фізико-хімічної точки зору тісто для борошняних кондитерських виробів відноситься до структурованим масам [4]. Змінюючи співвідношення сировини і параметри технологічного процесу, отримують тісто з різними властивостями і структурою. Однак включення в рецептуру нових компонентів та додаткових механічних впливів призводить, як правило, до зміни реологічних властивостей тіста і вимагає коректування конструктивних та технологічних параметрів процесу [1].

У процесі виробництва бубликів нерідко відбувається руйнування дисперсної системи тіста, в результаті чого властивості випеченого напівфабрикату зазнають значні зміни. Ці зміни виявляють істотний вплив на процеси, енергетичні втрати й інші показники роботи устаткування. При цьому реологічні властивості тіста залежать не тільки від зміни градієнта швидкості, але й від температури. При технологічній обробці тісто піддається впливу зовнішніх навантажень, що викликають його деформацію, внаслідок якої в тісті виникає внутрішня напруга. Для вибору технологічних режимів виробництва й удосконалення технологічного обладнання важливо знати закономірні зміни реологічних властивостей тіста [4, 5, 6].

У практику сучасного бубличного виробництва при замісі й обробленні впроваджуються різні способи механічних впливів на тісто. Ці впливи повинні

бути правильно розподілені в тісті по швидкості деформацій і температурі, щоб, наприклад, відформовані заготовки зберігали свою вихідну форму протягом усього процесу формування.

Бубличне тісто має пухку і разом з тим в'язку консистенцію за рахунок вмісту дріжджів та цукру в рецептурі, що обмежує набухання клейковини борошна. Воно відноситься до категорії пружно-в'язко-пластичних тіл, для яких характерне поєднання пружної і пластичної деформації. Тому при дослідженні реологічних властивостей харчових продуктів крім пластичних і пружних властивостей необхідно визначати такий показник як тривалість релаксації (або швидкість релаксації) внутрішньої напруги, створених в зміненому зазорі між валками за умови постійної величини деформації.

Релаксація – процес зниження і вирівнювання внутрішніх напружень внаслідок переходу пружної частини деформації в пластичну. Це має дуже велике значення при формуванні бубликів [5]. Відповідно до сучасних уявлень, під релаксацією розуміють процес поступового розсіювання запасеної в тісті енергії пружною деформацією шляхом переходу її в тепло. В результаті релаксації напруги знижуються. При цьому відбувається зниження пружних властивостей і одночасне збільшення пластичних властивостей тіста. Час релаксації дослідних зразків бубличного тіста зменшується зі збільшенням його обробки. Це, обумовлено тим, що тісто в своєму складі містять значну кількість клітковини і нерозчинних у воді білків, які сприяють зниженню в'язкості і еластичності тіста. Що, в свою чергу, дозволяє краще зберігати форму тістових заготовок і не розпливатися при випічці.

При приготуванні бубличного тіста велике значення має його консистенція, яка обумовлює його якісні та технологічні показники, а також поведінку в процесах деформації. Однією з механічних характеристик тіста, що визначають його консистенцію, є в'язкість, що залежить від природи і хімічного складу рецептурних компонентів. Тому тісто піддавали деформаціям з різною вологістю (22–26%), при різній температурі (22–30°C) і тривалості дії валків (деформації) (5–20 хв). При цьому визначали максимальне напруження зсуву, що характеризує пластичну міцність тіста, тобто його консистенцію.

Встановлено, що максимальне напруження зсуву тіста залежить від виду деформацій. При одній і тій же вологості і температурі тісто на початку процесу має менше значення напруги зсуву, ніж тісто на 15 хв (рис. 1.2).

З підвищенням вологості тіста до 24% його граничне напруження зсуву знижувалося, а якість бубличного тіста поліпшувалося. Подальше збільшення вологості тіста призводило до його зайвого розрідженню, виробу з нього

виходили розпливчатої форми з низьким підйомом. Вологість тіста нижче 22% приводила до зниження якості бубликів. При підвищенні температури серцевого тіста до 22°C його гранична напруга зсуву знижується, причому найбільше зниження відзначається в тісті при завершенні формування. Подальше підвищення температури призводить до зтягуванню тіста, про що говорить підвищення його пластичної міцності, що приводить до отримання бубликів стягнутої форми. При температурі тіста нижче 20°C воно має велику величину граничної напруги зсуву, а якість готових виробів з нього значно є гіршою.

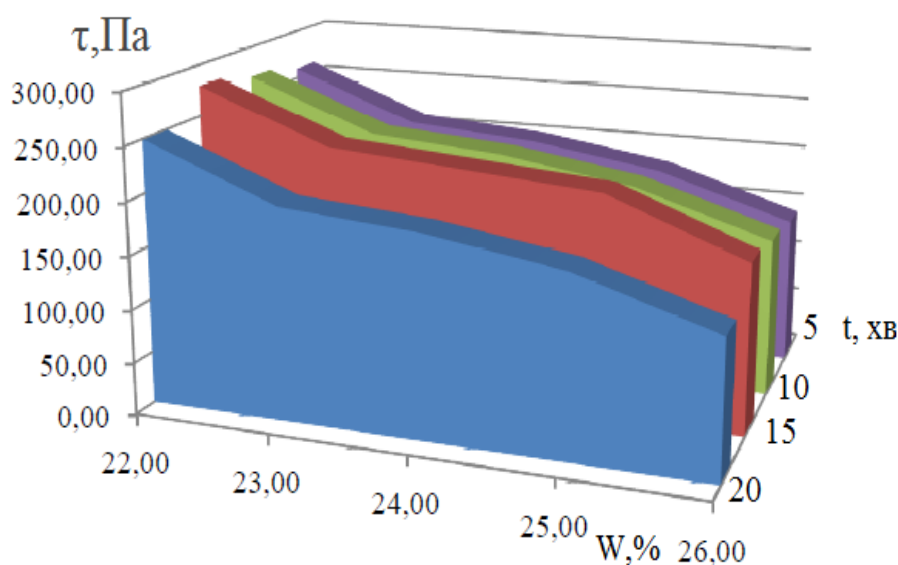


Рис. 1.2. Залежність граничного напруження зсуву формованого тіста від його вологості

Таким чином, отримання готових виробів високої якості забезпечується при вологості тіста 23–24% і температурі 22–24°C. Знаючи про характер зміни пружно-пластичних деформацій тіста можна визначити його поведінку в ході технологічного процесу приготування, на стадії оброблення і формування тістових заготовок. В даному випадку пластичність характеризує здатність тіста до формування, тобто до отримання окремих тістових заготовок заданного розміру без ушкоджень і розривів, пружність вказує на здатність відформованих тістових заготовок зберігати надану форму. Тривалість замісу тіста буде залежати від факторів визначальних протікання колоїдних процесів в тісті, його фізичних властивостей.

Для утворення пластичного тіста з обмежено набряклими білками борошна тривалість повинна бути достатньою для формування однорідного тіста. Чим більше маса вільної води в тісті, тим за інших рівних умов коротше тривалість замісу.

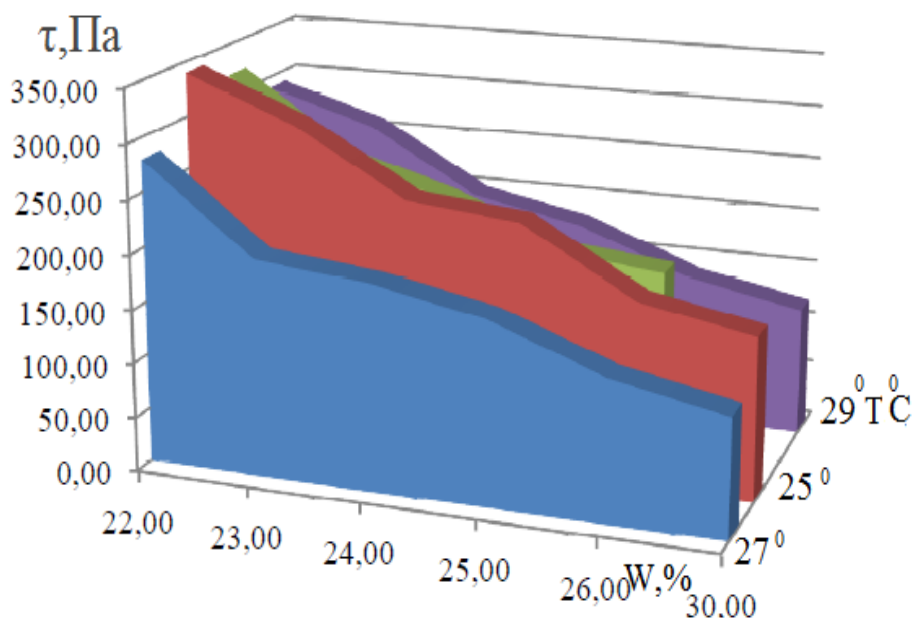


Рис. 1.3. Залежність граничного напруження зсуву тіста від його температури

У процесі формування бубликів, тісто постійно знаходиться в стані руху, яке супроводжується його деформацією. Для того щоб викликати течю тіста по каналах формуючих машин із заданою швидкістю, необхідно прикласти до нього певні зусилля, які будуть залежати від в'язкості тіста. Як показали дослідження [4, 6, 7], реологічні характеристики тіста залежать від багатьох параметрів і, в першу чергу, від швидкості зсуву, температури і вологості. Аналіз отриманих даних показав, що ефективна в'язкість зменшується при збільшенні швидкості зсуву, причому найбільш інтенсивно в дослідних зразках на 5 хв процесу [6]. Це пов'язано з тим, що збільшення діючих напруг і відповідних градієнтів швидкості деформації поступово руйнує структуру тіста. Зменшення в'язкості тіста в результаті рекомбінації структури після її руйнування може привести до зниження обсягу і збільшення щільності готових виробів [7].

Оцінку впливів нагнітання на структуру тіста в межах фіксованого часу здійснювали на основі визначення залишкової відносної деформації ε_v

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V_c}{V_c}$$

де V_c – початковий об’єм оброблюваного тіста.

Досліди виконувалися в умовах трифакторного експерименту, характеристики якого наведено у табл. 1.2 та 1.3. Наведені результати вказують на можливість суттєвого підвищення швидкості процесу за рахунок конструкції валків.

Таблиця 1.2

Характеристики параметрів трифакторного експерименту щодо швидкості нагнітання тіста

Величина	Фактори		
	Тиск, КПа	Температура тіста, °С	Час нагнітання, с
Кодове позначення фактора	z_1	z_2	z_3
Основний рівень z_i^0	0,4	30	300
Інтервал варіювання	0,2	15	60
Нижній рівень z_{iH}	0,2	15	240
Верхній рівень z_{iB}	0,6	45	360

Таблиця 1.3

Дані для постановки експерименту і результати по визначенню швидкості нагнітання тіста

№ досліджу	Фактори				Швидкість деформації обробленого середовища, г/с	Швидкість деформації необробленого середовища, г/с
	z_0	z_1	z_2	z_3		
1	+	–	–	–	0,706	0,514
2	+	+	–	–	0,904	0,514
3	+	–	+	–	0,804	0,604
4	+	+	+	–	1,006	0,604
5	+	–	–	+	0,806	0,514
6	+	+	–	+	1,11	0,514
7	+	–	+	+	0,832	0,604
8	+	+	+	+	1,218	0,604

Статистична обробка дозволила одержати рівняння регресії у кодованому вигляді та трансформоване до фізичних змінних

$$\varepsilon_v = -12,075 + 60,63P + 0,805t + 0,062\tau - 1,875Pt - 0,0573P\tau - \\ - 0,00155t\tau + 0,0031Pt\tau.$$

З досліджень встановлено [4, 7], що реологічні характеристики дають змогу формалізувати багато технологічних операцій і оптимізувати їх протікання, а також оцінити в комплексі структуру виробів. Крім цього, дані реології дають практичну цінність по визначенні та встановленні конструктивних параметрів валків й робочої камери вузла нагнітання. Геометрію валків та їх конструктивний розвиток відображається в подальших розділах монографії. Одночасно наводиться дослідження, які розглянуто в її першій частині.

1.2.2. Оцінка динаміки перебігу перехідних процесів при нагнітанні тіста

Оскільки важливими чинниками тіста є утримувальна здатність по газовій фазі і рівень дисперсності, то додаткове енерговведення на рівні зовнішніх тисків означає точні локалізовані впливи, рівень яких визначається на основі процесів ізотермічного або адіабатного стискання (розширення). Наявність таких даних дає можливість визначення часу перехідних процесів. Флуктуація тисків у середовищі має своїм наслідком змінні за напрямком потоки масообміну на межі поділу фаз. Оцінка динаміки перебігу таких процесів здійснюється на основі лінійних диференціальних рівнянь процесу, які доповнюються закономірностями зміни тисків. Кінцевим результатом розв'язання таких рівнянь є визначення швидкості сорбції (десорбції) та оцінка енергетичного потенціалу цього процесу.

В математичних моделях напрямок масообмінного потоку по кисню програмується як односпрямований від газової фази до рідинної, тоді як потік по діоксиду вуглецю має обов'язково зворотний напрямок. Кількісна оцінка величини матеріального потоку CO_2 і його енергетичний потенціал здійснювалися за методикою, аналогічною щодо масообмінних потоків на межі поділу фаз [5].

Енергетичні впливи знайшли визначення на основі порівнянь питомої

енергії утворення поверхні, віднесеної до об'єму бульбашок і з врахуванням Лапласівської складової тиску. На основі встановлення співвідношень енергетичних параметрів здійснюється перехід до визначення впливу швидкості контактування фаз на рівень дисперсності газової фази.

Подальший розвиток моделювання перехідних процесів пов'язувався з фізичним уявленням про динамічний газорідинний шар, як про пружне тіло, що складається з нестискуваної рідинної і стискуваної газової фаз. Таким чином, в умовах швидкоплинних зовнішніх тисків на тісто валками, саме газова фаза відіграє роль пружної складової, завдяки якій газорідинне середовище може вважатися метапружним. Газова фаза розподілена по об'єму рідинної і її масою у порівнянні з масою рідинної можливо знехтувати. У зв'язку з цим маса рідинної розподіленої фази за способом Релея в еквівалентній схемі визначається як приведена. Термодинамічні співвідношення стосовно газової фази дозволяють визначити її об'ємну деформацію, що є підґрунтям до визначення жорсткості системи. Наявність стабілізованих гідродинамічних параметрів газорідинних систем дає підстави вважати їх метастабільними, а з врахуванням таких характеристик, як приведена маса і жорсткість здійснюється перехід до одномасової еквівалентної коливальної системи – моделі реального об'єкта [5, 6].

Рушійний фактор в ній визначається добутком зовнішнього тиску на площу поперечного перерізу стискуваного тіста на поверхні валка, а протидіючою силою в деформації газорідинного середовища виступають пружні сили і сили внутрішнього тертя [5]. Одержана модель дозволяє відслідковувати впливи різних законів зміни зовнішніх тисків на динаміку внутрішніх тисків системи за використання в якості аналітичних моделей диференціальних рівнянь руху другого порядку. Для уточнення ролі окремих факторів системи здійснено планування і постановку обчислювальних експериментів з одержанням відповідних рівнянь регресій.

1.2.3. Властивості оптимальних параметрів впливу робочих органів на оброблювання крохмалю

При визначенні оптимальних параметрів дії обочих органів на середовище, основний вплив на якісні показники чинить хімічний склад сировини, а саме кількість і стан білкових речовин, вуглеводів, жирів. Безумовно, важливу роль відіграє крохмаль, кількість якого в зернових перевищує 60%. А тому дослідження дії робочого органу на стуктуру крохмалю представляє собою необхідну і важливу задачу.

Крохмаль за своїми властивостями відноситься до групи набухаючих, а за методом обробки – до тих, що піддалися механічному впливу при температурі вище клейстеризації. Таке механічне оброблення призводить до часткового розриву водневих зв'язків, втрати крохмалю своєї первинної структури, поглинання волони, набухання. Ступінь та швидкість набухання залежать від характеру фізико-хімічних зв'язків в гранулах і від структурних характеристик даного виду крохмалю [5, 6].

В університеті харчових технологій проводились дослідження впливу деяких параметрів екструзії на фізико-хімічні показники кукурудзяного реагенту. Однак ці дослідження були лабораторними, а також переносити результати екструзії кукурудзяного реагенту на крохмаль було б помилково через їх різний хімічний склад. Окремі дослідження Карпова В. Г., Жушмана А. І., Бабиченко Л. В. стосовно крохмалів носять не системний характер і не дають можливості прослідити впливу механічних параметрів на їх фізико-хімічні показники [20]. Змінними параметрами процесу були вологість сировини, температура та ступінь навантаження на робочі органи. За змінними фізико-хімічними показниками крохмалю прийняті розчинність водопоглинальна здатність, здатність до набухання, в'язкість та об'ємна маса. На основі великої кількості експериментальних досліджень було встановлено, що стабільна робота робочого органу спостерігається при температурі 25–30°C. значення температури нижче 20°C веде до адгезійної міцності на поверхні робочого органу з підвищеною вологістю, що спричиняє необхідність додаткових механічних затрат. При температурі більшій 32°C суттєво прискорюється процес теплової деструкції крохмалів, відбувається піроліз крохмалю із зміною забарвлення.

При вологості суміші 18–24% в робочій камері відбувається отримання однорідної структури крохмалю. Ці межі пов'язані з тим, що при механічній дії на крохмаль з вологістю менше 18% необхідна підвищена кількість енергії. це визначається малою пластичністю маси, що утворюється в камері змішування. Вміст вологи більше 24% ускладнює наступні технологічні операції, тому в даному випадку одержують підвищену щільність, що вимагає додаткових затрат енергії на процес. Встановлення закономірностей змін фізико-хімічних показників крохмалю в процесі дії робочого органу дає рекомендації для вибору та проектування конструктивних параметрів робочої камери та робочих органів.

Однією з основних властивостей крохмалю, що впливають на якість структури виробу є в'язкість. З початком клейстеризації зерен крохмалю в'язкість дисперсій підвищується, досягаючи максимального значення. Чим

вища температура оброблення крохмалю в робочій камері, тим швидше відбувається досягнення максимальної в'язкості клестеру і настає її зниження. встановлено, що після додаткового інтенсивного оброблення знижується максимальна в'язкість крупних зерен крохмалю. Для мілких зерен спостерігається постадійне набухання.

1.3. Структура валкових машин та рух в'язкої рідини

Підвищення ефективності формувального обладнання є актуальним напрямом розвитку науки і техніки, якому приділяється значна увага в Україні і світі. Один із прогресивних методів інтенсифікації процесів у середовищах полягає у проведенні їх у валково-пульсаційних вузлах, в яких обробка неньютонівських рідин здійснюється внаслідок комплексної дії механічних (стискання, зсув, розтягування) і гідродинамічних (тертя, пульсації тиску, кавітація та ін.) впливів.

При дослідженні вузла нагнітання основна увага приділяється модифікаціям їх конструкцій [4], впливу конструкційних та режимних параметрів на характеристики течії середовищ між валками і методам розрахунку робочих органів [3, 4, 6]. Але на ефективність протікання процесів і кінцеву якість продукції, окрім зазначених аспектів, впливає і спосіб нагнітання. Тематичний огляд джерел інформації вказує на недостатню вивченість цього питання.

До валкових машин відносяться валки і каландри. 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 матеріалу з валками процеси переробки на валках і каландрах в значній мірі аналогічні.

Необхідною умовою затягування суміші в простір між валками є те, щоб кут захоплення був меншим або, принаймні, рівним куту тертя матеріалу до поверхні вала. Існує три групи методів математичного опису періодичного процесу обробки тіста на валкових машинах. До першої групи відноситься метод, що базується на виведенні емпіричної залежності, одержаної обробкою експериментальних даних за допомогою теорії подібності і аналізу розмірностей та рівнянь. 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 відносяться методи, побудовані на припущенні, що полімерні матеріали є речовинами яскраво вираженою межею текучості, а сам процес деформації валкованої маси аналогічний прокатування металу. На підставі даного припущення М. М. Майзелем використано диференціальне рівняння рівноваги елемента в зоні деформації полімеру.

До третьої групи опису процесів валкування і каландрування відноситься теорія, в основі якій лежить уявлення про те, що полімерні матеріали в процесі переробки поведуться як рідини, процес течіння яких може бути описаний рівнянням гідромеханіки. Ця теорія одержала назву гідромеханічної.

Всі розроблені до теперішнього часу гідромеханічні методи розрахунку основних параметрів процесу періодичного валкового нагнітання засновані на наближеному рішенні задачі ламінарної течії нестискуваної в'язкої або вязкопружної рідини між двома циліндровими валками, що обертаються. Не дивлячись на порівняно велику кількість гідромеханічних методів, що описують процес обробки полімерного матеріалу валками, загальними допущеннями, що приймаються в них для спрощення задачі, є наступні:

- 1) рух рідини вважається сталим і плоскопаралельним;
- 2) швидкість руху тіста у напрямі осі X значно переверщує швидкість руху у напрямі осі Y ;
- 3) тісто приймається нестискуваним, і виникаючі дотичні напруги значно перевершують нормальні;
- 4) рух тіста приймається ізотермічним, отже, рівняння енергії не розглядається;
- 5) масовими силами, зважаючи на їх невеликі значення, нехтуємо.

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

Рух в'язкої рідини. Розглянемо несталий рух рідини, при якому швидкості і тиски в кожній точці потоку змінюються з часом. Виділимо в потоці рухомої рідини елементарний паралелепіпед з ребрами dx , dy і dz (рис. 1.4).

Внаслідок нерозривності потоку, увесь об'єм виділеного паралелепіпеда буде постійно заповнений рухомим тістом. При цьому маса стисливого тіста, яка надходить і виходить з паралелепіпеду, у загальному випадку буде різною, що обумовлено непостійністю величин швидкості w і густини ρ . Через ліву грань A , паралельну площині YOZ , рідина рухається під впливом складової швидкості v_x , паралельної вісі OX . Будемо вважати цю складову, а також густину ρ постійними в усіх точках цієї грані і рівними їхнім значенням у точці A : $v_x=f_1(x, y, z, t)$, $\rho=f_2(x, y, z, t)$,

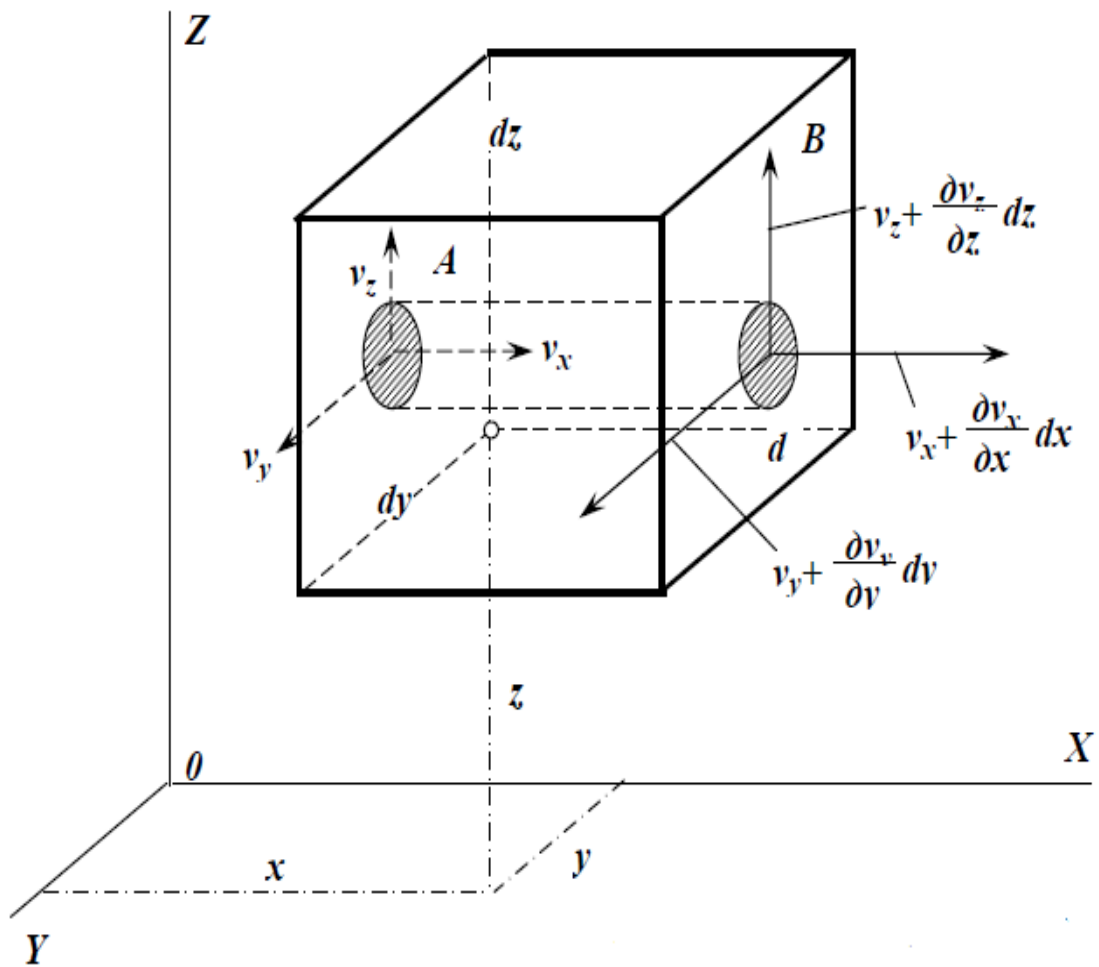


Рис. 1.4. Елемент тіста у русі

У той же момент часу для протилежної правої грані B ці величини будуть: $v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx$; $\rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} dx$.

Через площадку $dydz$ лівої грані за одиницю часу витікає кількість рідини (в одиницях маси): $dM_x = \rho v_x dy dz$.

1.3.1. Дослідження переміщення тіста між обертовими валками

Для визначення характеру режиму роботи вузла нагнітання розглянуто його ефективність в рамках стохастичної моделі на основі ланцюгів Маркова.

Для цього весь об'єм вузла розбивається на ряд однакових елементарних об'ємів – зон. Для початку, видокремлено об'єм одного валу – циліндр за вирахуванням суміжного циліндричного сегменту, що нагнітається сусіднім валом (рис. 1.5).

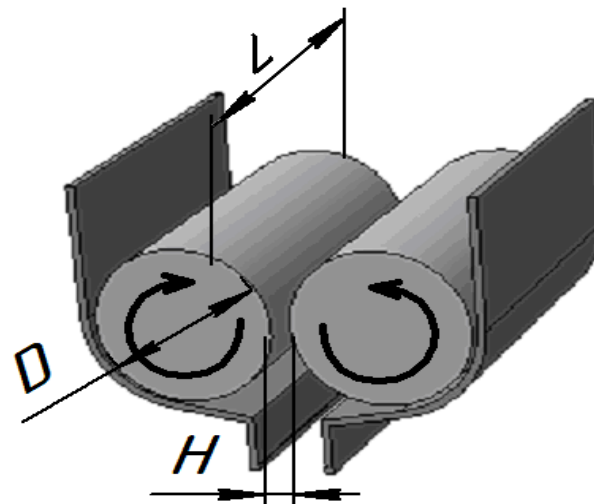


Рис. 1.5. Схема елементарного об'єму:

D – діаметр валка; H – відстань між поверхнями валків; L – довжина валка

Далі циліндри розбиваються на змішувальні зони, кількість яких відповідає числу встановлених на валу лопатевих механізмів (див. рис. 1.6).

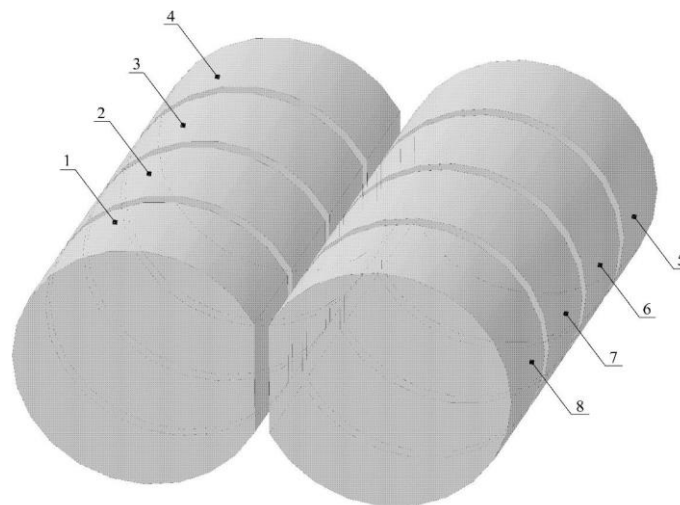


Рис. 1.6. Об'ємна модель із 8 уявних зон нагнітання тіста

Виходячи із визначення процесу нагнітання в теорії динамічних систем, як властивості системи «забувати» інформацію про початкову умову (стан) із плином часу, розглянемо переміщення тіста як функцію забуття (крива Еббінгауза) і задамося визначити цей час.

Для опису руху системи скористаємося неоднорідними ланцюгами Маркова, тобто перехідні імовірності $p_{ij}(t)$ залежать від часу й існує такий момент t , який відповідає певному переходу n при якому матриця перехідних

імовірностей є незмінною. Цей стан системи – «стан забуття» – має відповідати часу $t_{сп}$, який визначає початок *III-го періоду* на кінетичній кривій процесу нагнітання, при якому швидкість нагнітання дорівнює швидкості сегрегації, тобто V_c не змінюється з часом.

Отже, аналіз робочого процесу нагнітання тіста примусової дії спрямований на знаходження граничного коефіцієнта неоднорідності $V_{сп}$. – найменше значення коефіцієнта в часі $t_{сп}$, при досягненні якого течія тіста стає однорідною (рівномірною). Цей показник характеризує вузол нагнітання, його ефективність та якість течії тіста.

Спираючись на загальну теорію ланцюгів Маркова, початковий стан можна охарактеризувати вектором $G(0)$, кожна складова $g_i(0)$ якого є імовірністю знаходження одного із елементів тіста в i -й нагнітальній зоні:

$$G(0)=[g_1(0),g_2(0),\dots,g_k(0)], \quad (1.1)$$

де k – число розбитих ділянок на валку нагнітальних зон.

Задаємося імовірністю течії частинки з i -ї нагнітальної зони в j -у, що утворює матрицю течійних імовірностей (з'єднань). Згідно теорії Маркова, після n течій (обертів валків) розподіл тіста по зонам може бути записано у вигляді матричного добутку:

$$G(n)=G(0)p^n, \quad (1.2)$$

де p – матриця ймовірностей переходу розмірності $k \times k$;

$G(n)=[g_1(n), g_2(n), \dots, g_k(n)]$ – вектор стану системи після n переходів.

Для оцінки неоднорідності $V_n, \%$, розподілу тіста після переходів визначатиметься:

$$V_n = 100k \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k \left[g_i(n) - \frac{1}{k} \right]^2}.$$

Кращим нагнітачем тіста вважається той, який за менше число обертів (менший час переміщення) забезпечує досягнення заданої величини V_3 .

Для визначення імовірності течії тіста в тому чи іншому напрямку розглянемо найбільш розповсюджені схеми потокоутворення кільцевого (у формі цифри 8), які наведені на рис. 1.7. Вважається, що за один оберт валу тісто із імовірністю p перейде в сусідній осередок, з імовірністю q в опозитний та із r залишиться в ньому: $p+q+r=1$.

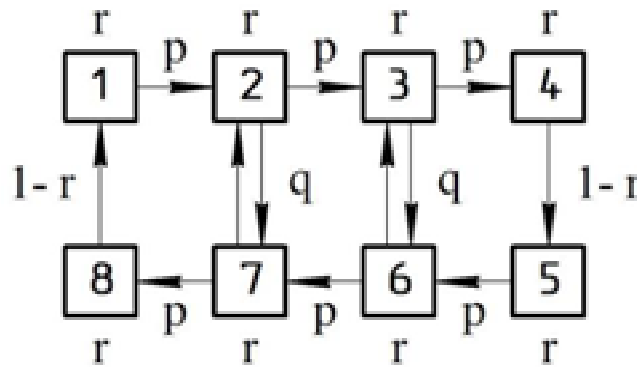


Рис. 1.7. Схема потокоутворення частки тіста при кільцевому нагнітанні

Визначення імовірності течії частки тіста здійснюватиметься виключно експериментальним шляхом на прикладі однієї із зон нагнітання. За допомогою ресурсів програмного забезпечення MathCAD моделюється один течії тіста у відповідних напрямках залежно від кута повороту валка з пазами. Імовірність течії визначається численним моделюванням, керуючись рандомним алгоритмом програми «білий шум». Отримані результати оброблюються статистичними методами, в результаті чого імовірність течії набуває розмірної величини, що відтворює різницю ентропії до та після течії.

Для адекватності проведеного експерименту слід відтворити реологічні властивості тіста. Більшу точність опису процесу течії може надати тривимірні імовірнісна модель (див. рис. 1.8).

В даній схемі приймається ширше уявлення про імовірність залишення тіста в тій самій нагнітальній зоні і описується її переміщення в ньому. Як показано на рис. 1.8, переміщення тіста в нагнітальній зоні здійснюється в радіальному та коловому напрямках, що при двовимірній схемі вважалось залишенням тіста в тій самій зоні, і відповідало імовірності r .

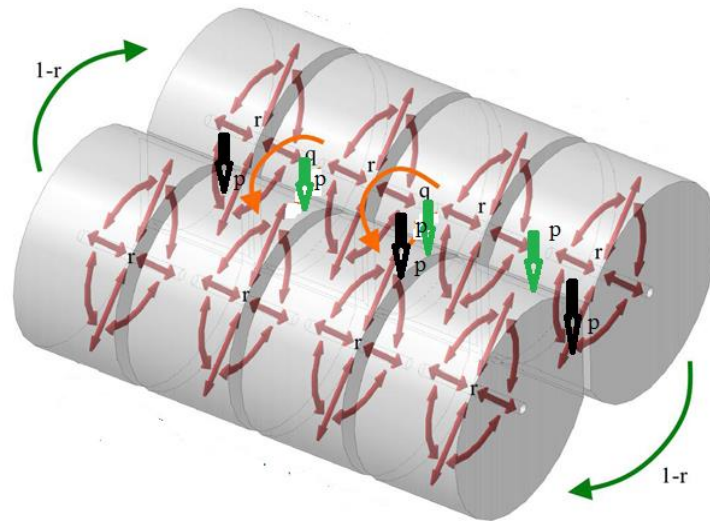


Рис. 1.8. Схема переміщення тіста між обертовими валками

Розглядаючи просторову схему руху тіста й переміщення частинок у вузлі нагнітання, представимо імовірність залишання в тій самій зоні, як сукупну імовірність переміщення тіста в радіальному S та коловому C напрямку. Також, рух тіста вздовж осі валка визначатиметься імовірністю осьового переміщення A , тоді імовірність обміну із протилежною зоною E нагнітання (див. рис. 1.9).

- *Радіальний напрямок* – являє собою переміщення тіста в межах ряду робочого органу вузла, в напрямку від осі до найбільшого радіусу (корпусу вузла) і в зворотному напрямку. Кожну із нагнітальних зон, розбиваємо послідовно в радіальному напрямку на NS рівних кілець;

- *Коловий напрямок* – являє собою переміщення тіста в межах поверхні робочого органу вузла нагнітання, по замкнутому циркуляційному контуру. Кожну із зон, розбиваємо в коловому напрямку на CR рівних секторів (α – кут сектора, град); $NC=360^\circ\alpha$.

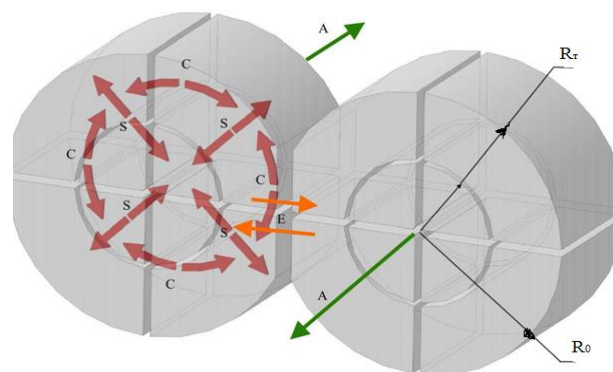


Рис. 1.9. Розрахункова схема для опису всіх переміщень тіста на валку в зоні нагнітання

Для подальшого розрахунку необхідно знати значення наступних параметрів:

N_j – кількість осередків в кожній з отриманих частин (зон)

$$N_j = N_C \cdot N_S; \quad (1.3)$$

J_C Нумерація зон в кожній з отриманих частин із індексом приросту:

$$J_C = (nS - 1) \cdot N_C; \quad (1.4)$$

Номер кільця:

$$nS = 1, N_S; \quad (1.5)$$

Радіус кільця валка, за умови однакового об'єму осередків:

$$R_i = \sqrt{R_{i-1}^2 - \frac{R_0^2}{N_S}}, \quad i = \overline{1, N_S - 1}.$$

Стан системи в момент часу $\tau = k \cdot \Delta T$, де k – номер переходу, ΔT – тривалість переходу, виражається у вигляді вектор-стовпчика із розміром.

$$(N_I \times N_j) \times 1: S_k = [S_{1k} \ S_{2k} \ \dots \ S_{N_j k} \ S_{N_j+1k} \ \dots \ S_{N_j \cdot (N_j-1)k} \ S_{N_j \cdot N_I k}] T, \quad (1.6)$$

Наступний стан системи S_{k+1} залежить від поточного та може бути представлено в матричній формі:

$$S_{k+1} = S_k \cdot P, \quad (1.7)$$

де P – матриця перехідних ймовірностей.

В свою чергу, матриця перехідних ймо-вірностей із врахуванням трьох напрямів переміщення частинок матеріалу визначається за формулою:

$$P = P_C \cdot P_S \cdot P_A, \quad (1.8)$$

де P_C – матриця течії ймовірностей при переміщенні частинок в коловому напрямку;

P_S – матриця течії ймовірностей при переміщенні частинок в радіальному напрямку;

P_A – матриця течії ймовірностей при переміщенні частинок в осьовому напрямку.

Описана модель дозволяє вираховувати номер переходу (оберт валу) після якого матриця перехідних ймовірностей перестане змінюватись в часі, і це означитиме, що нагнітання тіста набуло стаціонарного стану, а отже найвищої якості. Цей підхід значно підвищує ефективність роботи формувальної машини і дозволяє стверджувати про зменшення тривалості циклу нагнітання.

1.3.2. Роль механічної енергії у формуванні якості готового продукту

Забезпечення людства енергетичними ресурсами є однією з ключових проблем теперішнього часу. Особливо це стосується харчових технологій, які вважаються одним з лідерів по споживанню енергетичних ресурсів в економічно розвинених країнах світу [1, 2, 4]. На сучасному етапі виробники продуктових бубликів стикаються з жорсткими регламентаціями з безпеки харчових продуктів, питомої енергоємності технології та екологічну чистоту підприємства. Комплексне вирішення цих проблем перспективно для харчових систем. Зниження кількості спожитої енергії не тільки підвищить енергетичний ККД процесу і знизить собівартість продукту, але і зменшить рівень механічного впливу на продукт. А це дозволить випускати бублики, які стануть відповідати вимогам функціонального харчування.

Основним процесом більшості харчових технологій є дія робочих органів на обробку компонентів з подальшим утворенням середовища та дія на нього при процесах формування виробу. Саме цей процес визначає якість готового продукту, витрати енергії і собівартість його виробництва. Очевидні науково-технічні протиріччя між зростаючими вимогами до якості харчового продукту, енергоємності його виробництва і технікою гідродинаміки.

Механічна обробка нерідко призводить до перегріву, а також до погіршення якості продукту. При невдалому гідродинамічному процесі дія робочих органів руйнує цінні компоненти, такі як вітаміни, антиоксиданти і ароматичні речовини, які в ній містяться. Результатом служать відчутні втрати значної частини корисних властивостей продукту. Таким чином, традиційні

механічні впливи на обробку харчової сировини призводять до двох основних проблем: перевитрати енергії і втрат якості продукту.

Нами вивчались особливості робочих процесів валкового нагнітання тістових напівфабрикатів на установках та агрегатах різноманітних типів із ціллю вдосконалення методів їх розрахунку та проектування. Досить великий обсяг досліджень викладено в першій частині монографії [4]. Тому, на наш погляд, дуже важливим показником, що характеризує ефективність роботи вузла нагнітання формувальних машин для напівфабрикатів із тіста є необхідна потужність для здійснення цих процесів.

В хлібопекарній та кондитерській промисловості для розрахунку необхідної потужності робочих органів, які застосовуються в установках для приготування і поділу тіста, знайшов застосування метод розрахунку, який заснований на визначенні пускової потужності. В результаті вивчення взаємодії робочих органів із напівфабрикатами з тіста, даний метод був вдосконалений та пристосований для розрахунку змішувачів та пристроїв з робочими органами не тільки простої форми (горизонтальними та вертикальними), але й з криволінійними, робочими органами складної конфігурації.

При обертальних рухах валкових робочих органів для рідких напівфабрикатів із тіста виникає опір середовища, а також тертя середовища об бокові поверхні робочих органів. Енергія, яку одержує тісто від валкових обочих органів, рівна потужності, необхідній для подолання лобового опору середовища, може бути визначена виходячи із переміщення елементарного об'єму напівфабрикату елементарної площадки робочого органу.

$$dN = \frac{\psi \cdot dV \cdot \rho \cdot v^2}{2} \quad (1.9)$$

де ψ – коефіцієнт, який залежить від форми робочого органу, враховуючи збільшення площі поперечного перерізу потоку напівфабрикату по відношенню до елементарної площадки робочого органу;

ρ – густина напівфабрикату, кг/м³;

v – кутова швидкість елементарної площадки робочого органу, с⁻¹.

Для криволінійних робочих органів, таких як валки:

$$dV = df \cdot v = 2\pi \cdot n \cdot x^2 \cdot \sin \alpha \cdot dx \cdot d\alpha \quad (1.10)$$

де n – частота обертання робочого органу, c^{-1} .

$$dN = \frac{2\psi(2\pi)^3 \rho \cdot n^3 \cdot \sin^3 \alpha \cdot x^4}{2} dx \cdot d\alpha \quad (1.11)$$

При розрахунку вузла нагнітання із робочими органами складної конструкції, їх слід розділяти на ділянки простої форми (горизонтальні, вертикальні, похилі і т. д.) та визначати необхідну потужність для кожної із цих ділянок. У зв'язку з тим, що в формуючих пристроях для рідких напівфабрикатів із тіста робочі органи, як правило, мають невелику бокову поверхню, об яку тертя середовища в розрахунках можна не враховувати. Це пов'язано з тим, що бокові поверхні не беруть участі в нагнітанні тіста, так як вони із ним не контактують.

На основі цього методу та іншого розрахунку, який забезпечує високу збіжність розрахункових та експериментальних даних (різниця для рідких напівфабрикатів вологістю 30–32% не перевищує 10–15%), розроблені та рекомендовані валкові робочі органи для нагнітання, в тому числі для вперше запропонованого і здійсненого на формувальній машині Б-4–58 (розгляд у подальших розділах). Було встановлено, що розрідження тіста відбувається значно менше ніж при використанні старих (існуючих) валків. Першому випадку утворюється достатньо однорідна маса, в той час як при розрідженні тіста спостерігається деяке відмивання клітковини. Більше того, в цьому випадку спостерігається прискорення наростання кислотності в тісті за рахунок більш рівномірного розподілення у ньому дріжджових клітин та утворюючих кислоти бактерій.

В роботі вивчений вплив механічної взаємодії валків на якісні показники напівфабрикатів із тіста та якість готової продукції. Встановлено, що робочі органи не надають негативного впливу на тісто. Хоч при використанні шнекових валків, спостерігається деяке порушення цілісності клейковини, однак це помітно не позначається на якість формування виробу. Навпаки, механічна взаємодія робочих органів на тісто сприяє більш рівномірному розподіленню в них мікрофлори, при цьому покращуються умови обміну речовин між мікрофлорою і її середовищем, що сприяє інтенсифікації процесу бродіння тіста.

1.4. Режими і параметри роботи вузла нагнітання

1.4.1. Основні технологічні параметри вузла

Основними розрахунковими технологічними параметрами вузла є: продуктивність Π , частота обертання валів ω , потужність двигуна P .

Продуктивність визначають як добуток поперечного перерізу матеріалу S_m , що переміщується, на швидкість переміщення v_m тіста між обертовими валками до розвантажувального отвору, м³/год:

$$\Pi = 3600 S_m v_m \text{ або } \Pi = 3600 \pi (R_2 - r_2) b_{л} / k_{зв} k_{зп} n, \quad (1.12)$$

де R, r – відповідно зовнішній (шар тіста на валку) і внутрішній радіуси, м;

$b_{л}$ – проекція ширини валка на напрям обертання, м;

$k_{зв}$ – коефіцієнт звороту тіста, який залежить від числа пазів;

$k_{зп}$ – коефіцієнт заповнення робочої камери ($k_{зп} \sim 0,55 \dots 0,60$);

n – частота обертання валків, с⁻¹.

Кутову швидкість обертання валка ω знаходять з умов, за яких тісто утримується на поверхні, $Fi \leq F_T + G \sin \beta$, де β – кут між тістом площиною валка в момент нагнітання, град.

Виразивши в цій умові відцентрову силу $Fi = G g \omega^2 R$ та силу тертя $F_T = G f \cos \beta$ через силу ваги частинки G , кутову швидкість ω і радіус R , матимемо:

$$G \omega^2 R g \leq G f \cos \alpha + G \sin \beta,$$

де f – коефіцієнт тертя тіста по валку.

Звідси критична кутова швидкість валу, с⁻¹: $\omega_{кр} \leq \sqrt{(f \cos \beta + \sin \beta) g / R}$.

З урахуванням раціональних значень кута $\alpha \approx 34 \dots 54^\circ$ та коефіцієнта тертя $f \approx 0,3 \dots 0,6$ частота обертання валків, с⁻¹:

$$n = 0,4 \dots 0,5 / \sqrt{R}. \quad (1.13)$$

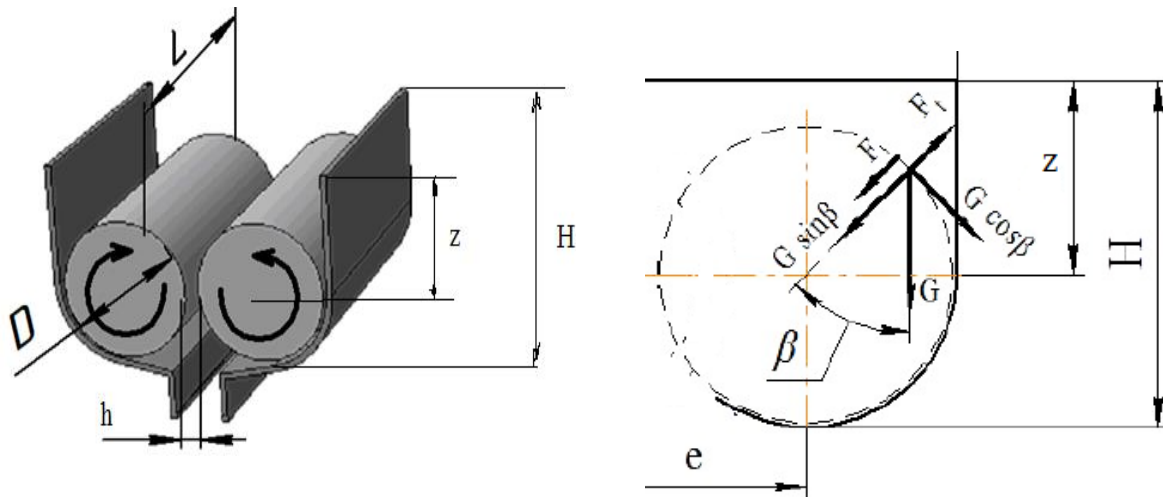


Рис. 1.10. Схема для розрахунку основних конструктивних параметрів вузла нагнітання де e – міжосьова відстань, м; L – ширина камери, м; z – висота змішувальної камери над віссю обертання валу, м; H – висота камери, м

Числові значення частоти для продуктивності $\Pi=(5...60)$ м³/год лежать у межах $n=(1,08...0,8)$, $c-1$.

1.4.2. Визначення геометричних параметрів вузла нагнітання

Геометричні параметри (див. рис. 1.10) вузла нагнітання – довжина камери L , її ширина B , висота H , ширина валка L м, діаметр m , і відстань між валками – встановлюють з таких співвідношень:

$$\begin{aligned} L &= 1,5R; z = 1,35R; L = 4,25R; B = L + 2R = 3,5R; \\ H &= h + R = 2,35R. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Цілком імовірно, що радіус залежить від об'єму камери чи об'єму завантаженого тіста. Радіус R можна встановити на основі оцінки розмірів і параметрів вузла нагнітання для робочого середовища та принципу його роботи. Так, встановлено, що відношення довжини корпусу до його ширини залежить від кількості парних пазів $k_{\text{п}}$ на кожному валку: $L/B=(0,12...0,14)k_{\text{п}}$.

$$\text{Звідси: } L=(0,12...0,14)Bk_{\text{п}}. \quad (1.15)$$

Довжину корпусу робочої камери можна також виразити рівнянням:

$$L=S(k_{\Pi}-1)+2S_1, \quad (1.16)$$

де S – крок пазів на валку;

S_1 – відстань від осі кільцевого пазу до осі валка.

Знайшовши загальну довжину корпусу за формулою (1.16), визначають крок S пазів. При цьому беруть $S=3S_1$, величину кроку завжди приймають округлено, тоді загальну суму S і S_1 визначають згідно з величиною L . При цьому $S=Lk_n$.

Місткість робочої камери у вагових одиницях, кг:

$$G_M=SL\rho k_3,$$

де S – площа перерізу тіста, м²;

ρ – густина тіста, кг/м³.

При куті нахилу тіста на поверхні валка $\alpha=40\dots45^\circ$ площа, м²:

$$S=(2,933\dots2,854)R_2. \quad (1.17)$$

Маса тіста, кг:

$$S_M=(1,21\dots1,41)k_{\Pi}k_3R_3\rho, \quad (1.18)$$

Місткість робочої камери в об'ємних одиницях, м³:

$$V=(1,21\dots1,41) k_{\Pi}k_3R_3. \quad (1.19)$$

Отже, формула (1.19) дозволяє знайти радіус R . На заключній стадії конструювання вузла нагнітання розрахункові розміри, що були знайдені за (1.14) і (1.15), уточнюються. Потужність визначається за (1.14). Для попереднього аналізу можна використати й емпіричну формулу – $P=32,5 V$ г.с.0,86.

1.4.3. Основні принципи та алгоритм створення даного класу машин

Результати даного дослідження покладені в основу створення алгоритму проектування валкового вузла нагнітання для формувальних, тісто подільних,

розкатувальних машин та алгоритму порівняльної оцінки двох машин одного типу, або ж різного.

Алгоритм проектування передбачає три етапи, які спрямовані на енергоефективність процесу нагнітання методом термодинамічних потенціалів. Це є визначення енергоефективного процесу, як еволюції термодинамічної системи до стану рівноваги, з використанням класичного методу термодинамічних потенціалів. Такий перехід термодинамічної системи з початкового нерівноважного стану до кінцевого рівноважного стану, відповідає закінченню процесу нагнітання. У загальному випадку енергетичний аналіз повинен включати енерговитрати на формування бульбика в продукт заданої якості.

У першому наближенні тісто можна розглядати як компонентну двофазову термодинамічну систему. Рідкі компоненти, які знаходяться в робочому об'ємі вузла нагнітання є рідинною фазою, другу тверду фазу складає борошно. При цьому обидві фази перебувають в одному об'ємі з теплоємністю, унаслідок чого параметри можна вважати постійними, а подібну систему – ізольованою термодинамічною системою.

Енергоефективним рахуватимемо процес нагнітання з мінімальними питомими витратами енергії необхідними для фазового переходу рідких компонентів, що містяться в тісті з певною функціональною залежністю хімічного потенціалу від вологовмісту W і температури T , при заданих відхиленнях параметрів рідинної фази (T_1, P_1, μ) від рівноважних значень.

Як термодинамічний потенціал модельної системи виберемо енергію Гіббса або ізобарно-ізотермічний потенціал $G=U+PV-TS$. Процес переходу даної системи до стану рівноваги необоротний і при цьому виконується умова для приросту потенціалу $dG < 0$. В стані рівноваги потенціал G матиме мінімальне значення для певних параметрів системи. Відповідно до теорії термодинаміки, зміна термодинамічного потенціалу системи рівна «роботі всіх узагальнених сил, що діють на систему». Різниця потенціалів між станами 1 (початок процесу нагнітання) і 2 (течії в'язкого-пружного тіста) для процесу нагнітання фіксована, і визначається тільки початковими і кінцевими станами. Тому величини роботи або відповідні енергетичні витрати визначатимуться виходячи з шляху, за яким здійснюється еволюція системи. Цей шлях буде залежати від функціонального взаємозв'язку певного роду термодинамічних параметрів системи. Також величина напірної течії та зсувної течії викликана робочим органом характеризує енерговитрати на проведення процесу нагнітання.

У вузлі нагнітання дискретної дії течія має більш складну природу і

визначається більшою кількістю факторів. Тут взаємодія фаз відбувається під впливом зовнішніх силових полів, зумовлених обертанням валків в змінних зазорах, що визначає особливості конструкції машини. Завдяки своїй в'язкості, компоненти мають рух менший чим валки [6, 7]. Таким чином, ми маємо велику швидкість валка відносно компонентів. Товщина зазору, безперечно, дуже мала, а тому градієнт швидкості повинен бути великий при нормальному атмосферному тиску. Виникаючий поперечний тиск перешкоджає контакту між компонентами і рухомою поверхнею валків, урівноважує гідростатичний тиск. Тобто, коли зазор стає менший, то градієнт швидкості збільшується до тих пір, поки цей тиск не зрівноважиться гідростатичним тиском. Інший поперечний тиск, який діє у напрямку потоку і являє собою розтягування, викликає тиск стягування, обумовлений нагнітанням. Все це здійснює вплив на напрям руху течії між валками та певним чином ускладнює їх дослідження [6, 7, 23].

Взол нагнітання забезпечує багатократне утворення та руйнування дисперсного потоку тіста на кожному кільцевому елементі валка при зустрічному потоці. Така організація взаємодії фаз дозволяє підвищити ефективність проведення масообмінних процесів за рахунок чисельних кінцевих ефектів при формуванні структури тіста, розвинутої поверхні контакту диспергованої суміші рідких компонентів та постійному їх оновленню на кожному кільцевому елементі за рахунок складній поверхні валків.

Відповідно максимальна швидкість досягається на внутрішньому радіусі, при чому цей період є найбільш критичним – в ньому при максимальній швидкості компонентів мінімальна відцентрова сила. Тут найменша різниця протидій сил повітря і клапану конструкції та відцентрового прискорення тіста і саме в цьому перетині починається інтенсивне нагнітання. В зв'язку з цим величина швидкості газової фази (повітря) в цьому місці є найбільш визначальною в порівнянні із іншими ділянками, вона визначає граничні умови режиму течії в камері. Саме тут та вище ми при характеристиці руху компонентів оперуватимемо швидкістю течії.

При просуванні тіста у кільцевому зазорі найбільш вагомими напрямками руху течії є рух вздовж координат Z та X , при цьому у каналі камери мають місце:

- за координатою Z : зсувна течія;
- за координатою X : складна течія, що має градієнтну (напірну) та зсувну компоненти вздовж осі X .

Процес нагнітання при установленому режимі можна розглядати як стаціонарний, отже похідні по часу у рівняннях руху дорівнюють нулю. У випадку зсувної течії з високою в'язкістю рух під дією сили тяжіння

$$x = R_n, v_0 = 0 \quad (1.23)$$

$$x = R_v, v_0 = V = 2\pi R_{cp} n$$

Це дасть рівняння для визначення складової компоненти швидкості v_0 :

$$v_0 = \frac{V}{\ln \frac{R_v}{R_n}} \cdot \ln x + \frac{V}{2} \left(1 - \frac{\ln(R_v R_n)}{\ln \frac{R_v}{R_n}} \right) \quad (1.24)$$

А складова швидкості деформації D відповідно:

$$D = \frac{dv_0}{dx} = \frac{V}{\ln \frac{R_v}{R_n}} \cdot \frac{1}{x} + \frac{V}{2} \left(1 - \frac{\ln(R_v R_n)}{\ln \frac{R_v}{R_n}} \right) \quad (1.25)$$

Отже, одержано рівняння для розрахунку профілю швидкості та швидкості деформації. Сумісний розв'язок цих рівнянь дозволить проаналізувати ламінарну течію в зазорі між валками за ізотермічних умов.

Характер течії компонентів значно залежить від властивостей їх та супроводжується дисипативними тепловиділеннями. Оскільки густина та теплопровідність в зоні проходження гомогенізації змінюються незначно, то найбільший вплив на поле швидкості має в'язкість. В'язкість компонентів характеризується ступенем не ньютонівської поведінки та зміною консистентності в процесі нагнітання. Проведені дослідження впливу в'язкості на характер течії показав, що за однакових технологічних умов чим вищий показник в'язкості, тим нижча швидкість.

Представлений аналіз процесу нагнітання, як переходу термодинамічної системи в стан рівноваги, з використанням методу термодинамічних потенціалів, дозволяє провести оцінку характеру течії, як енергоефективний шлях реалізації процесу. Показано, що найбільший вплив на перебіг процесу має в'язкість, яка характеризується функціональними залежностями величин, що входять у відповідні рівняння. Проведений аналіз дозволяє прогнозувати технологічні режими процесу нагнітання на формувальній машині.

Висновки. Розглянуто напрями технологічного прогресу в харчовій промисловості, що визначаються зокрема, державною політикою в галузі здорового харчування, економічними та соціальними змінами у суспільстві, новими технологічними можливостями традиційної харчової продукції. Проведено пошук у створенні машин нового покоління, що відповідають сучасним вимогам та готової продукції збагаченої важливими нутрієнтами та із подовженим терміном зберігання.

Недоліком борошняних кондитерських виробів, в яких як основа використовується напівфабрикат, є короткий термін реалізації та зберігання. На структурно-механічні властивості, смак та аромат впливає якість сировини, що входить до складу рецептури бублика. Використання інгредієнтів рослинного походження, зокрема нетрадиційних видів борошна, які могли б попередити черствіння може вважатися перспективною розробкою, що цікавитиме виробників кондитерських виробів [4].

Раціональний режим гіродинамики руху середовища зменшує, а іноді практично виключає можливість виникнення бактеріальних і ферментативних змін в продукті. Розуміння рівня механічного впливу робочих органів на перебіг хімічних реакцій в середовищі дає можливість ефективного управління процесами при зберіганні або виробництві продукту.

Правильна оцінка енергії інактивації ферментів і енергії руйнування мікроорганізмів дозволяє розробити сучасні промислові способи нагнітання тіста, засновані на короткочасній його обробці при підвищених обертах робочих органів.

Надано рекомендації модифікаціям конструкцій валків, впливу конструкційних та режимних параметрів на характеристики течії середовищ між валками і методам розрахунку робочих органів.

Проведено аналіз впливу механічної взаємодії валків на якісні показники напівфабрикатів із тіста та якість готової продукції. Встановлено, що робочі органи не надають негативного впливу на тісто. Хоч при використанні шнекових валків, спостерігається деяке порушення цілісності клейковини, однак це помітно не позначається на якості формування виробу.

Визначено геометричні параметри вузла нагнітання. Результати покладені в основу створення алгоритму проектування валкового вузла нагнітання для формувальних, тістоподільних, розкатувальних машин та алгоритму порівняльної оцінки двох машин одного типу, або ж різного.

Алгоритм проектування передбачає три етапи, які спрямовані на енергоефективність процесу нагнітання методом термодинамічних потенціалів.

Представлений аналіз процесу нагнітання, як переходу термодинамічної системи в стан рівноваги, з використанням методу термодинамічних потенціалів, дозволяє провести оцінку характеру течії, як енергоефективний шлях реалізації процесу.

Показано, що найбільший вплив на перебіг процесу має в'язкість, яка характеризується функціональними залежностями величин, що входять у відповідні рівняння.

Проведений аналіз дозволяє прогнозувати технологічні режими процесу нагнітання на формувальній машині.

Список використаної літератури

1. Пересічний М. І., Кравченко М. Ф., Карпенко П. О. Технологія продукції громадського харчування з використанням біологічно активних добавок. К. : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2003. 321 с.
2. Лавринов А. Свойства компонентов биологически активных добавок. М., 1999. 54 с.
3. Мачихин Ю. А., Белокрылов Ю. Ф., Калинина С. М. Релаксация давления в тестовых и конфетных массах при объёмном нагружении. Известия вузов. Пищевая технология. 2005. № 2–3. С. 84–87.
4. Стадник І. Я., Піддубний А. В. Удосконалення технологічного процесу та обладнання для формування виробів /монографія. К. : 2019. 290 с.
5. Дробот В. І. Технологія хлібопекарського виробництва. К. : ЛО-ГОС, 2002. 365 с.
6. Пащенко Л. П. Биотехнологические основы производства хлебобулочных изделий. М. : Колос, 2002. 368 с.
7. Пучкова Л. И., Поландова Р. Д., Матвеева И. В. Технология хлеба. СПб. : ГИОРД, 2005. 559 с.
8. Sirbu A. Bread flavours for a better consumers acceptance. Baking Europe. – 2014. P. 13–16.
9. Reuben B. Coultate T. Bread chemistry. On the rise. Chemistry World. 2009. No. 10. P. 54–57.
10. Salim-ur-Rehman A., Paterson A., Piggott J. R. Flavour in sourdough breads: a review. In: Trends in Food Science and Technology. 2006. Vol. 17, No. 10. P. 557–566.
11. Заворохина Н. В. Современные ольфакторно-вкусовые предпочтения покупателей как основной фактор, мотивирующий покупку. Техника и технология пищевых производств. 2010. № 4. С. 32–35.

12. Ауэрман Л. Я. Технология хлебопекарного производства: учебник. изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Л. И. Пучковой. СПб : Профессия, 2003. 416 с.
13. Козлов Г. Ф. Повышение эффективности хлебопекарного производства на основе интенсификации процессов тестоприготовления : дис. д-ра техн. наук: 05.18.12, 05.18.01. Одесса: ОТИПП им. М. В. Ломоносова. Одесса, 1990. 582 с.
14. Bakery Products. Science and Technology / Y. H. Hui, H. Corke, I. De Leyn et al. Blackwell Publishing, 2006. 575 p. URL : <http://197.14.51.10:81/pmb/AGROALIMENTAIRE/Bakery%20Products%20Science%20And%20Technology.pdf>.
15. Черных В. Я, Артамонов А. В., Максимов А. С. О создании информационно-управляющей системы при замесе пшеничного теста. Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 8. С. 8–11.
16. Shewry R., Popineau Y., Lafiandra D., Belton P. Wheat glutenin subunits and dough elasticity: findings of the EUROWHEAT project. Trends in Food Science & Tecnology. 2001. № 11. P. 433–441. URL : http://www.researchgate.net/profile/Domenico_Lafiandra/publication/222668411_Wheat_glutenin_subunits_and_dough_elasticity_findings_of_the_EUROWHEAT_project.pdf.
17. Luchian M. I., Csatos C. Research on change in protein composition during dough processing / Agricultural Food Engineering. 2011. Vol. 4 (53). № 1. P. 109–114. URL : <http://webbut.unitbv.ro/bu2011/Series%20II/BULLETIN%20II%20PDF/Luchian%20MI.pdf>.
18. Belitz H. D. Structure and Function of Gluten Proteins. Cereal Chemistry. 1986. Vol. 63 (4). P. 336–341. URL : http://www.aaccnet.org/publications/cc/backissues/1986/Documents/Chem63_336.pdf.
19. Shewry P. R., Tatham A. S. The prolamin storage proteins of cereal seeds: structure and evolution. Biochemical Journal. 1990. Vol. 267. P. 1–12. URL : http://www.researchgate.net/publication/20971846_The_prolamin_storage_proteins_of_cereal_seeds_structure_and_evolution.
20. Belton P. New approaches to study the molecular basis of the mechanical properties of gluten. Journal of Cereal Science. 2005. Vol. 41 (2). P. 203–211.
21. Hamer R., Van Vliet T. Understanding the structure and properties of gluten: an overview. Royal Society of Chemistry. 2000. P. 125–131.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ГАЗОРІДИННИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ ТИСКІВ

Поглиблене вивчення гідродинаміки взаємодії газорідинних систем з зовнішніми впливами і збуреннями дозволяє оцінити перспективи інтенсифікації масообміну і разом з тим впливи на її структурно-механічні властивості.

Останнє може мати подвійний наслідок. Для випадків накопичення мікроорганізмів в інтересах технологій є їх активація, підвищення якісних показників, збільшення виходу, покращення структури готового виробу. Аналогічні результати очікуються і у випадках мікробіологічних технологій, за різних видів бродіння тощо.

Однак по завершенню технологічних процесів нагнітання тіста у багатьох випадках необхідно забезпечити структурний перехід в статичний стан, щоб досягти якісного ефекту формування виробу.

Подібні багатопланові перспективи, тим не менш часто зорієнтовані на однакові методи обробки середовищ.

Дослідження, результати яких викладені в розділі 2, приводять до висновку про доцільність цілеспрямованого введення додаткових енергетичних потоків в зону утворення міжфазної поверхні тіста та поверхні валків в формі пульсацій, створення додаткових силових потенціальних полів, організованої гідродинаміки тощо.

2.1. Динаміка газорідинних систем в умовах створених тисків обертовими валками

Розглянемо фіксований об'єм газорідинного середовища, що знаходиться в режимі безперервного стискання обертовими валками. Хоча таке середовище є безумовно динамічним, однак його характеристичні показники, що стосуються утримувальної здатності, гідродинаміки тощо залишаються на рівні, який можна вважати умовно стабільним. Це припущення дозволяє вважати газорідинне середовище (тісто) умовно пружним тілом, відносно якого можливо застосувати методи опору матеріалів і динаміки матеріальних систем [1, 2].

Розглянемо перебіг процесів в такій системі за умови зростання зовнішнього тиску (рис. 2.1).

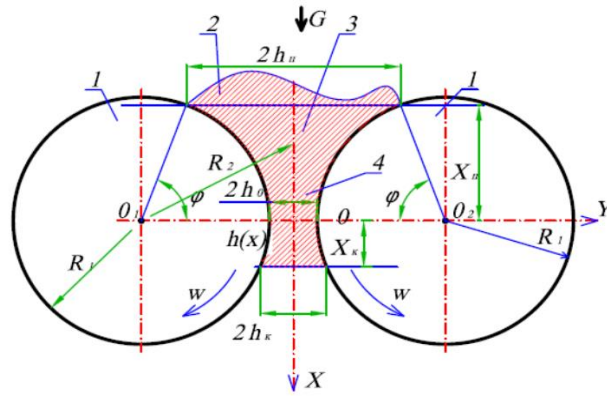


Рис. 2.1. Розрахункова схема зовнішнього стискування тіста валками

Очевидно, що за умови наявності газової фази в початковому об'ємі u_1 за зростання зовнішнього тиску від початкового значення P_1 до якогось P_2 газова фаза зменшується в об'ємі до u_2 з проявом певних пружних властивостей.

За аналогією з механічними системами розглядатимемо масив газорідної системи як середовище, що підлягає одновісному стисканню під дією зовнішньої сили PF , де F – площа перерізу масиву тіста. В результаті такого процесу висота шару зменшиться від величини h_1 до h_2 , а абсолютна деформація складе (більш детально розглянуто в 4 розділі першої частини монографії) [1].

$$\Delta h = h_1 - h_2. \quad (2.1)$$

Відношення силової дії до величини лінійної деформації середовища назвемо жорсткістю системи c

$$c = \frac{PF}{\Delta h} = \frac{PF}{h_1 - h_2}. \quad (2.2)$$

Значення h_1 та h_2 визначимо за формулами

$$h_1 = \frac{V_{\text{рід}} + u_1}{F}; \quad h_2 = \frac{V_{\text{рід}} + u_2}{F}. \quad (2.3)$$

Тоді маємо

$$\Delta h = \frac{V_{\text{рід}} + u_1}{F} - \frac{V_{\text{рід}} + u_2}{F}. \quad (2.4)$$

З умови ізотермічного процесу витікає

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{P_1}{P_2}; \quad u_2 = u_1 \frac{P_1}{P_2}. \quad (2.5)$$

Підстановкою (2.5) в рівняння (2.4) одержуємо

$$\Delta h = \frac{V_{\text{рід}} + u_1}{F} - \frac{V_{\text{рід}} + u_1 \frac{P_1}{P_2}}{F} = \frac{u_1(P_2 - P_1)}{P_2 F}. \quad (2.6)$$

Тоді з врахуванням рівняння (2.2) пружність (жорсткість) системи виражається у формі

$$c = \frac{P_2^2 F^2}{u_1(P_2 - P_1)}, \quad \frac{H}{m}. \quad (2.7)$$

З теорії коливань відомо, що жорсткість системи є однією зі складових, що визначає її власну частоту коливань. Іншою важливою складовою виступає маса. В нашому випадку остання має розподілений по висоті шару характер. В такому випадку здійснюється перехід до приведеної маси.

Очевидно, що для випадку газорідинної системи можливо знехтувати масою газової фази і в приведеній врахувати тільки масу рідинної фази [3].

Визначення приведених мас здійснюється на принципі еквівалентності кінетичних енергій. В нашому випадку скористаємося способом Релея для системи сталого перерізу F , що підлягає стисканню для представлення її у вигляді зібраної маси і пружного невагомому зв'язку [3].

На висоті x виділимо елементарну ділянку висотою dx .

Кінетична енергія виділеного елемента

$$dE_k = \frac{\rho v_x^2}{2} dx, \quad (2.8)$$

де ρ – густина газорідинної суміші (тіста);

v_x – швидкість руху елементарного об'єму.

Якщо швидкість руху шару на висоті h_1 позначимо через v , то при $F = \text{const}$ можливо прийняти

$$v_x = \frac{vx}{h_1}.$$

Тоді одержуємо

$$dE_k = \frac{F\rho v^2}{2l^2} x^2 dx, \quad (2.9)$$

а повна кінетична енергія системи

$$E_k = \int_0^{h_1} \frac{F\rho v^2}{2l^2} x^2 dx = \frac{F\rho v^2 h_1}{6} = \frac{mv^2}{6}, \quad (2.10)$$

де m – маса газорідинної системи.

Кінетична енергія приведеної до перерізу з висотою h_1 маси записується у формі

$$E_{k.pr} = \frac{m_{pr} v^2}{2}. \quad (2.11)$$

За умовою приведення мас $E_k = E_{k.pr}$ записуємо

$$\frac{m_{pr} v^2}{2} = \frac{mv^2}{6}. \quad (2.11)$$

Звідси визначаємо

$$m_{pr} = \frac{m}{3}. \quad (2.13)$$

2.1.1. Фаза стискання середовища

За наявності знайдених приведеної маси і жорсткості одержуємо можливість перейти до аналізу системи, фізична модель якої наведена на рис. 2.2. Математичну модель руху приведеної маси системи запишемо у вигляді

$$m_{pr} \ddot{x} = PF + m_{pr} g - cx. \quad (2.14)$$

При цьому на першому етапі нехтуємо силами тертя газорідинної суміші зі стінками робочої камери. Рушійною силою виступає результуюча сила тиску P .

Перепишемо рівняння (2.14) у такій формі:

$$\ddot{x} + \frac{c}{m_{np}}x = \frac{PF}{m_{np}} + g. \quad (2.15)$$

Розв'язання цього рівняння має вид:

$$x = A \sin \sqrt{\frac{c}{m_{np}}}t + B \cos \sqrt{\frac{c}{m_{np}}}t + \frac{PF}{c} + \frac{gm_{np}}{c}, \quad (2.16)$$

де А та В – сталі інтегрування.

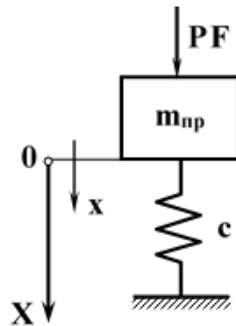


Рис. 2.2. Розрахунок модель системи

Для знаходження останніх задаємося початковими умовами

$$t_{(n)} = 0; \quad x_{(n)} = \frac{m_{np}g}{c}; \quad \dot{x}_{(n)} = 0. \quad (2.17)$$

При цьому вважаємо, що початковий тиск є на рівні P_1 .

Зміна тиску $P=P(t)$ може мати різні закони, у тому числі і значення близьке до $P=const$, де $P=P_2-P_1$.

Підстановкою початкових умов одержуємо:

$$\frac{m_{np}g}{c} = B + \frac{PF}{c} + \frac{m_{np}g}{c}; \quad (2.18)$$

$$B = -\frac{PF}{c}. \quad (2.19)$$

Для знаходження сталої інтегрування А виконаємо диференціювання рівняння (2.16)

$$\dot{x} = A \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} \cos \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t - B \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t, \quad (2.20)$$

звідки підстановкою умов (2.17) одержуємо $A=0$.

Таким чином остаточно розв'язання рівняння (2.15) записуємо так:

$$x = \frac{PF}{c} + \frac{gm_{\text{пр}}}{c} - \frac{PF}{c} \cos \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t. \quad (2.21)$$

Диференціюванням рівняння (2.21) одержуємо швидкість і прискорення приведеної маси:

$$\dot{x} = \frac{PF}{c} \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t; \quad (2.22)$$

$$\ddot{x} = \frac{PF}{m_{\text{пр}}} \cos \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t. \quad (2.23)$$

Одержана математична модель дозволяє встановити частоту власних коливань системи

$$f = \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}}. \quad (2.24)$$

Виконавши підстановку приведеної жорсткості системи c , одержуємо:

$$f = \sqrt{\frac{P_2^2 F^2}{u_1 (P_2 - P_1) m_{\text{пр}}}} = P_2 F \sqrt{\frac{1}{u_1 (P_2 - P_1) m_{\text{пр}}}}. \quad (2.25)$$

Таким чином, частота власних коливань залежить від початкового і кінцевого тисків, приведеної маси та початкової газотримувальної здатності [4]. Це означає, що зміна інтенсивності нагнітання тіста валками за інших рівних умов призводить до зміни частоти власних коливань системи. Якщо цей висновок повністю відповідає фізичній суті об'єкта досліджень, то на основі,

наприклад, феноменологічних міркувань складно було б прийти до висновку про те, що на параметр f впливають початкові і кінцеві тиски.

Очевидно, що значимість кожної аналітичної моделі і ступінь її наближення до реальних процесів залежить від застосованих гіпотез і припущень, покладених в її основу. Пошук методів результативних впливів на газорідинні системи засвідчує необхідність наближення частоти зовнішніх впливів до вказаного в умові (2.25) значення f .

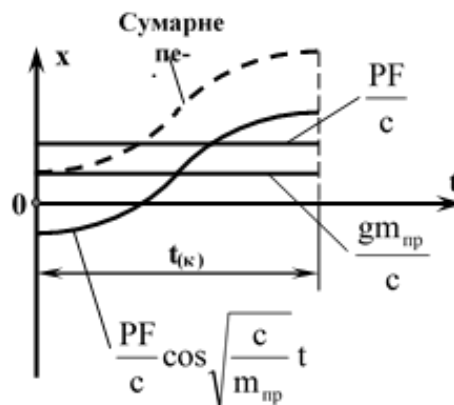


Рис. 2.3. Графічне представлення складових

Повернемося до аналізу одержаного рівняння (2.21), яке відображає рух площини поверхні газорідинної суміші тіста. На рис. 2.3 показано складові загального переміщення x , до якого входять дві статичні і одна динамічна складові. Максимальній деформації відповідає найбільший рівень стискання газової фази. Якщо не враховувати постійно діючу складову від сил тяжіння приведеної маси $m_{пр}$, то максимальна деформація x_{max} відповідає двом значенням деформацій від статичного навантаження.

Для визначення часу досягнення максимальної деформації необхідно праву частину виразу (2.22) прирівняти до нуля:

$$\frac{PF}{c} \sqrt{\frac{c}{m_{пр}}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_{пр}}} t_{(κ)}^I = 0. \quad (2.26)$$

За умовою задачі виразу (2.26) відповідає співвідношення

$$\sqrt{\frac{c}{m_{пр}}} t_{(κ)}^I = 2\pi. \quad (2.27)$$

Звідси визначаємо

$$t_{(к)}^I = 2\pi \sqrt{\frac{m_{пр}}{c}}. \quad (2.28)$$

Цьому часу відповідає значення

$$x_{max} = \frac{2PF}{c} + \frac{gm_{пр}}{c}. \quad (2.29)$$

Знайдені співвідношення дозволяють визначити максимальний силовий фактор, що відповідає максимальній деформації

$$x_{max}c = 2PF + gm_{пр}.$$

Звідси витікає, що результатом перехідного процесу є подвійне зростання тиску в пружному середовищі на момент часу, що відповідає $t_{(к)}^I$.

2.1.2. Фаза розширення газорідного середовища

Припустимо, що на момент досягнення $t_{(к)}^I$ дія імпульсного тиску припиняється і тоді за рахунок пружних властивостей буде мати місце друга фаза перехідного процесу, а саме розширення середовища [4, 5]. Йому відповідає рівняння:

$$m_{пр}\ddot{x} = m_{пр}g - cx, \quad (2.30)$$

яке перетворюється до виду

$$\ddot{x} + \frac{c}{m_{пр}}x = g, \quad (2.31)$$

Звідси маємо розв'язання

$$x = A_1 \sin \sqrt{\frac{c}{m_{пр}}}t + B_1 \cos \sqrt{\frac{c}{m_{пр}}}t + \frac{gm_{пр}}{c}. \quad (2.32)$$

Початкові умови другого етапу відповідають кінцевим умовам першого:

$$t_{(п)}^{II} = t_{(к)}^I; x_{(п)}^{II} = \frac{2PF}{c} + \frac{gm_{пр}}{c}; \dot{x}_{(п)}^{II} = 0. \quad (2.33)$$

Підстановкою початкових умов одержуємо

$$\frac{2PF}{c} + \frac{gm_{пр}}{c} = B_1 + \frac{gm_{пр}}{c}; B_1 = \frac{2PF}{c}. \quad (2.34)$$

Диференціювання виразу (2.32) приводить до форми:

$$\dot{x} = A_1 \sqrt{\frac{c}{m_{пр}}} \cos \sqrt{\frac{c}{m_{пр}}} t - B_1 \sqrt{\frac{c}{m_{пр}}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_{пр}}} t. \quad (2.35)$$

Звідси, після підстановки $\dot{x}''_{(n)} = 0$, маємо

$$A_1 = 0. \quad (2.36)$$

Тоді остаточно координата переміщення дорівнюватиме:

$$x = \frac{2PF}{c} \cos \sqrt{\frac{c}{m_{пр}}} t + \frac{gm_{пр}}{c}. \quad (2.37)$$

Йому відповідає графічна залежність, представлена на рис. 2.4. Час перебігу другого етапу $t''_{(к)}$ дорівнюватиме

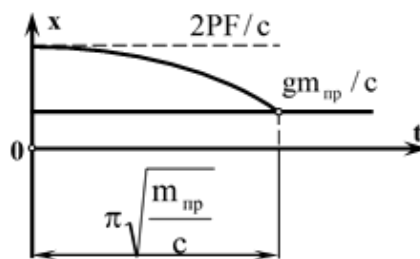


Рис. 2.4. Графік координати переміщень

$$t''_{(к)} = \pi \sqrt{\frac{m_{пр}}{c}} \quad (2.38)$$

і координата переміщення виходить на статичний рівень. Таким чином, сума часу двох етапів складе:

$$t_{\text{сум}} = t_{(к)}^I + t_{(к)}^{II} = 2\pi\sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{c}} + \pi\sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{c}} = 3\pi\sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{c}} \quad (2.39)$$

Очевидно, що з точки зору інтересів досягнення резонансних впливів на середовище дія імпульсних впливів зовнішніх регульованих тисків повинна мати частоту:

$$f_p = \frac{1}{3\pi\sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{c}}} = \frac{\sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}}}{3\pi}. \quad (2.40)$$

Враховуючи важливе значення записаного параметра f_p , представимо його у розгорнутому вигляді:

$$f_p = \frac{P_2 F \sqrt{\frac{1}{u_1 m_{\text{пр}}(P_2 - P_1)}}}{3\pi} = \frac{P_2 F}{3\pi \sqrt{u_1 m_{\text{пр}}(P_2 - P_1)}}. \quad (2.41)$$

Таким чином, на основі аналізу прийнятої моделі досягнута можливість визначення резонансної частоти імпульсних впливів тиску.

2.2. Динаміка тисків в середовищі з врахуванням дисипативних явищ

Подальше уточнення початкової моделі слід розшукувати на шляху врахування дисипативних властивостей системи. Проте, якщо виходити з механічних аналогій, то можливо стверджувати, що відсутність складових, які враховують затухаючий характер коливальних процесів, на екстремальні значення координат переміщень і тисків не впливає.

Затухаючий характер коливальних процесів є наслідком дії на систему не потенціальних сил опору, тобто сил тертя. Для випадку коливань з обмеженою амплітудою можна вважати, що сила тертя $F_m = -r\dot{x}$, де $r > 0$ – узагальнений коефіцієнт тертя.

Рівняння руху приведеної маси системи з урахуванням сил внутрішнього тертя має вигляд:

$$m_{\text{пр}}\ddot{x} + cx + r\dot{x} = PF + m_{\text{пр}}g, \quad (2.42)$$

або

$$\ddot{x} + \frac{c}{m_{np}} x + \frac{r}{m_{np}} \dot{x} = \frac{PF}{m_{np}} + g. \quad (2.43)$$

Позначимо:

$$\delta = \frac{r}{2m_{np}} - \text{коефіцієнт затування};$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m_{np}}} - \text{циклічна частота вільних коливань системи за відсутності сил}$$

тертя.

Зазначимо, що коефіцієнт затування має розмірність:

$$[\delta] = \frac{\text{Нс}}{\text{м} \cdot \text{кг}}.$$

У випадку, коли $\delta < \omega_0$, система виконує затуваючі коливання.

Розв'язання рівняння (2.42) у формі (2.43) відповідає випадку, коли $\delta < \omega_0$. До такого висновку приходимо в результаті аналізу характеристичного рівняння умови (2.42). В нашому випадку маємо

$$\lambda^2 + 2\delta\lambda + \omega_0^2 = 0, \quad (2.44)$$

звідки одержуємо корені:

$$\lambda_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} = -\delta \pm i\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}. \quad (2.45)$$

За уявних коренів λ_1 та λ_2 розв'язання рівняння (2.42) має вид:

$$x = e^{-\delta t} \left(A_0 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t + B_0 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t \right) + \frac{PF}{\omega_0^2 m_{np}} + \frac{g}{\omega_0^2}. \quad (2.46)$$

Для визначення сталих інтегрування A_0 та B_0 знайдемо:

$$\begin{aligned} \dot{x} = e^{-\delta t} \left(A_0 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t - B_0 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t \right) - \\ - \delta e^{-\delta t} \left(A_0 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t + B_0 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t \right) \end{aligned} \quad (2.47)$$

Підстановкою початкових умов: $t_{(п)}=0$; $x_{(п)}=\frac{m_{np}g}{c}$; $\dot{x}_{(п)} = 0$ визначаємо

$$x_{(п)} = B_0 + \frac{PF}{\omega_0^2 m_{пр}} + \frac{g}{\omega_0^2} = \frac{m_{пр}g}{c};$$

$$B_0 = \frac{m_{пр}g}{c} - \frac{PF}{\omega_0^2 m_{пр}} - \frac{g}{\omega_0^2};$$
(2.48)

$$\dot{x}_{(п)} = A_0 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} + \delta B_0 = 0;$$

$$A_0 = -\frac{\delta B_0}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} = -\frac{\delta \left(\frac{m_{пр}g}{c} - \frac{PF}{\omega_0^2 m_{пр}} - \frac{g}{\omega_0^2} \right)}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}.$$
(2.49)

Як видно з одержаного рівняння, врахування дисипативного розсіювання енергії приводить не тільки до різних форм коливальних процесів, а й до зміни частоти власних коливань

$$f = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{\frac{c}{m_{пр}} - \frac{r}{2m_{пр}}}.$$
(2.50)

Підстановкою значення c з умови (2.7), одержуємо

$$f = \sqrt{\frac{P_2^2 F^2}{u_1 m_{пр} (P_2 - P_1)} - \frac{r}{2m_{пр}}}.$$
(2.51)

Для визначення часу досягнення максимальної деформації газорідного шару прирівнюємо до нуля праву частину рівняння (2.47):

$$e^{-\delta t_{(к)}} \left(A_0 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t_{(к)} - B_0 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t_{(к)} \right) -$$

$$-\delta e^{-\delta t_{(к)}} \left(A_0 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t_{(к)} + B_0 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t_{(к)} \right) = 0.$$
(2.52)

Розв'язання останньої умови відносно $t_{(к)}$ доцільно здійснювати методом ітерацій.

Підстановка величини $t_{(к)}$ у рівняння (2.46) дозволяє записати

$$x - \delta t_{(к)} \left(A_0 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t_{(к)} + B_0 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t_{(к)} \right)_{max} + \frac{PF}{\omega_0^2 m_{np}} + \frac{g}{\omega_0^2} \quad (2.53)$$

Максимальна силова дія на газорідинну систему дорівнює:

$$cx - \delta t_{(к)} \left(A_0 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t_{(к)} + B_0 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t_{(к)} \right)_{max} + \frac{cPF}{\omega_0^2 m_{np}} + \frac{cg}{\omega_0^2} \quad (2.54)$$

При цьому динамічна складова тиску

$$P_{max}^{дин} = \frac{c x_{max}^{дин}}{F} = \frac{ce^{-\delta t_{(к)}} \left(A_0 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t_{(к)} + B_0 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t_{(к)} \right)}{F} \quad (2.55)$$

Очевидно, що впливи тиску, створеного при нагнітанні, викликають не лише збільшення статичних складових навантажень, а визначення динамічних складових (2.55) дозволяє знайти коефіцієнти динамічності і врахувати ці впливи при розрахунках конструкцій вузла нагнітання.

Визначаючи коефіцієнт динамічності $k_{дин}$, як відношення динамічної складової навантаження до статичного, запишемо

$$k_{дин} = \frac{P_{max}^{дин}}{P_{ст}} = \frac{ce^{-\delta t_{(к)}} \left(A_0 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t_{(к)} + B_0 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t_{(к)} \right)}{F \left(\frac{cP}{\omega_0^2 m_{np}} + \frac{cg}{F\omega_0^2} \right)} \quad (2.56)$$

Після припинення дії обертових валків (зовнішнього тиску) P_2 поведінка системи підлягає моделюванню у формі

$$\ddot{x} + \frac{r}{m_{np}} \dot{x} + \frac{c}{m_{np}} x = g \quad (2.57)$$

Цій формі відповідає перехідний процес другого етапу. Тоді для прийнятого співвідношення $\delta < \omega_0$ маємо розв'язання:

$$\begin{aligned}
 x &= e^{-\delta t} \left(A_1 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t + B_1 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t \right) + \frac{g}{\omega_0^2}, \\
 \dot{x} &= e^{-\delta t} \left(A_1 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t - B_1 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t \right) - \\
 &\quad - \delta e^{-\delta t} \left(A_1 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t + B_1 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t \right).
 \end{aligned} \tag{2.58}$$

Початкові умови другого етапу відповідають кінцевим умовам першого:

$$t_{(n)}^{\text{II}} = 0; \quad x_{(n)}^{\text{II}} = x_{(к)}^{\text{I}} = x_{\text{max}}; \quad \dot{x}_{(n)}^{\text{II}} = \dot{x}_{(к)}^{\text{I}} = 0.$$

Тоді за умови $t_{(n)}^{\text{II}} = 0$ одержуємо $\dot{x}_{(n)}^{\text{II}} = A_1 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} - B_1 = 0$.

$$\begin{aligned}
 x_1 \frac{g}{\omega_{01}^2} \frac{g}{\omega_{0max}^2} \cdot \\
 A_1 = \frac{x_{\text{max}} - \frac{g}{\omega_0^2}}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}.
 \end{aligned} \tag{2.59}$$

Підстановка значень A_1 та B_1 приводить до виду:

$$x = e^{-\delta t} \left(\frac{x \frac{g}{\omega_{0max}^2}}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t + \left(x \frac{g}{\omega_{0max}^2} \right) \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t} + \frac{g}{\omega_0^2} \right) \tag{2.60}$$

Завершується етап розширення системи за умови $\dot{x}_{(к)}^{II} = 0$, і цьому моменту відповідає $t_{(к)}^{II}$, яке визначається з рівняння:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{(к)}^{II} = 0 = e^{-\delta t_{(к)}^{II}} (A_1 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t_{(к)}^{II} - B_1 \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \cdot \\ \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t_{(к)}^{II}) - \delta e^{-\delta t_{(к)}^{II}} \left(A_1 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t_{(к)}^{II} + B_1 \cos \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} t_{(к)}^{II} \right) \end{aligned} \quad (2.61)$$

Сумарне значення часу перебігу першого та другого етапів

$$t_{\text{сум}} = t_{(к)}^I + t_{(к)}^{II} \quad (2.62)$$

Повернувшись до характеристичного рівняння (2.44) відмітимо, що виконаний аналіз поведінки системи в перехідних процесах стосується лише випадку, коли корені його уявні.

Якщо $\delta > \omega_0$, то має місце аперіодичне згасання, в якому розв'язання рівняння руху (2.42) має форму:

$$x = C_1 e^{-(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})t} + C_2 e^{-(\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})t} + \frac{PF}{\omega_0^2 m_{np}} + \frac{g}{\omega_0^2}, \quad (2.63)$$

де C_1 і C_2 – сталі інтегрування.

В результаті диференціювання рівняння (2.63), запишемо:

$$\dot{x}_{(к)} = -(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}) C_1 - (\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}) C_2 = 0, \quad (2.64)$$

$$C_1 = -\frac{\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}}{\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} C_2. \quad (2.65)$$

Підстановкою початкових умов в рівняння (2.63) визначаємо:

$$C_1 + C_2 + \frac{g}{\omega_0^2} = \frac{m_{np}g}{c}; \quad C_1 = \frac{m_{np}g}{c} - \frac{g}{\omega_0^2} - C_2 \quad (2.66)$$

З урахуванням рівняння (2.65) маємо:

$$-\frac{\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}}{\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} C_2 = \frac{m_{np}g}{c} - \frac{g}{\omega_0^2} - C_2;$$

$$C_2 \left(1 - \frac{\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}}{\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} \right) = \frac{m_{np}g}{c} - \frac{g}{\omega_0^2} - C_2; \quad (2.67)$$

$$C_2 = \frac{\frac{m_{np}g}{c} - \frac{g}{\omega_0^2}}{1 - \frac{\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}}{\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}}}$$

Для оцінки часу $t_{(к)}$ завершення процесу стискання середовища знайдемо з залежності $\dot{x} = \dot{x}(t)$ і прирівняємо результат до нуля:

$$\dot{x} = - \left(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} \right) C_1 e^{-\left(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} \right) t_{(к)}} - \left(\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} \right) \cdot C_2 e^{-\left(\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} \right) t_{(к)}} = 0 \quad (2.68)$$

Визначена величина $t_{(к)}$ може бути орієнтиром у виборі частоти зовнішніх впливів.

Зазначеній величині $t_{(к)}$ відповідає максимальна деформація

$$x1 \frac{-\left(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} \right) t_{(к)}}{2} - \frac{-\left(\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} \right) t_{(к)}}{2} \frac{PF}{\omega_0^2 m_{np}} \frac{g}{\omega_{0max}^2} \quad (2.69)$$

Кінцеві умови етапу стискання дозволяють приступити до визначення параметрів другого етапу, на якому рівняння руху після розв'язання має вид:

$$x = C_3 e^{-(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})t} + C_4 e^{-(\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})t} + \frac{g}{\omega_0^2} \quad (2.70)$$

$$\dot{x} = -\left(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}\right) C_3 e^{-(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})t_{(к)}} - \left(\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}\right) \cdot C_4 e^{-(\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2})t_{(к)}} \quad (2.71)$$

За початкових умов $x_{(п)}^{\text{II}}=0$; $x_{(п)}^{\text{II}}=x_{\text{max}}$; $\dot{x}_{(п)}^{\text{II}}=0$ маємо:

$$x_{\text{max}} = C_3 + C_4 + \frac{g}{\omega_0^2}; \quad (2.72)$$

$$C_3 = x_{\text{max}} - C_4 - \frac{g}{\omega_0^2}; \quad (2.73)$$

$$0 = -\left(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}\right)C_3 - \left(\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}\right)C_4, \quad (2.74)$$

$$-\left(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}\right)\left(x_{\text{max}} - \frac{g}{\omega_0^2} - C_4\right) - \left(\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}\right)C_4 = 0; \quad (2.75)$$

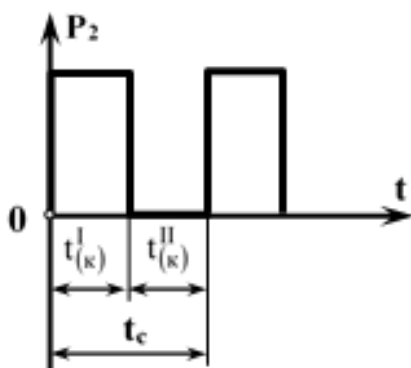


Рис. 2.5. Графік зміни зовнішніх тисків $P_2=P_2(t)$ за імпульсних впливів

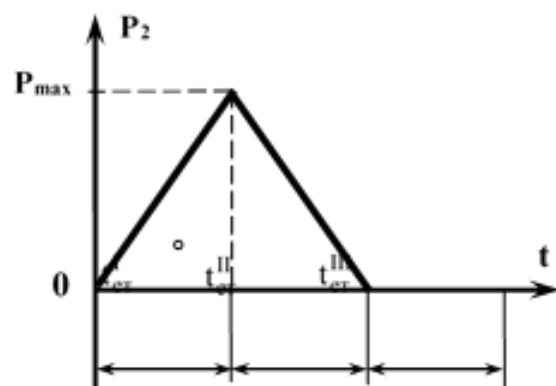


Рис. 2.6. Графік зміни зовнішніх тисків за лінійних законів

$$C_4 = \frac{\left(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}\right) \left(x_{\max} - \frac{g}{\omega_0^2}\right)}{\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} - \delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} = \frac{\left(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}\right) \left(x_{\max} - \frac{g}{\omega_0^2}\right)}{2\sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} \quad (2.76)$$

Завершується етап розширення системи за час $t_{(k)}^{\text{II}}$, якому відповідає $x_{(k)}^{\text{II}} = \frac{m_{\text{пр}}g}{c}$. Визначаємо $t_{(k)}^{\text{II}}$ ітераціями з формули

$$\frac{m_{\text{пр}}g}{c} = C_3 e^{-\left(\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}\right)t_{(k)}^{\text{II}}} + C_4 e^{-\left(\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}\right)t_{(k)}^{\text{II}}} + \frac{g}{\omega_0^2} \quad (2.77)$$

2.3. Динаміка газорідних середовищ за лінійних законів зміни тисків

Розроблені моделі, як бачимо дають можливість визначати амплітудно-частотні характеристики і орієнтуватися у виборі параметрів зовнішніх впливів. В розглянутих випадках передбачалися зовнішні тиски з пульсуючим законом (рис. 2.5). Досягнення закону $P_2 = P_2(t)$ з пульсуючим характером в апаратах промислових масштабів можливе за обмежених об'ємів вільного простору. Однак інші закони, наприклад лінійні, трапецеїдальні або синусоїдальні, реалізуються простіше.

Зупинимося на випадку лінійного закону зміни зовнішніх тисків (рис. 2.6). У цьому випадку доцільно мати три етапи. При цьому тиск P_2 діє тільки на першому та другому етапах.

На першому етапі маємо залежність $P_2 = k_p t$,

де k_p – коефіцієнт пропорційності, $k_p = \frac{P_{\max}}{t_{em}^I}$.

При цьому максимальне значення тиску може вибиратись із технологічних міркувань.

На другому етапі закон зміни тиску визначаємо з умови

$$P_2 = P \frac{P_{\max}}{t_{\text{ет}}^{\text{II}} \max}, \quad (2.78)$$

Відлік часу на другому етапі почнемо від нуля.

За таких умов рівняння руху приведеної маси газорідної суміші записується у формі

$$m_{np} \ddot{x} = F \frac{P_{max}}{t_{er}^I} t + m_{np} g - cx \quad (2.79)$$

для першого етапу. Перетворення рівняння (2.79) дозволяє записати

$$\ddot{x} + \frac{c}{m_{np}} x = \frac{F}{m_{np}} \frac{P_{max}}{t_{er}^I} \quad (2.80)$$

Розв'язання останнього рівняння записуємо у формі

$$x = A \sin \sqrt{\frac{c}{m_{np}}} t + B \cos \sqrt{\frac{c}{m_{np}}} t + \frac{F}{c} \cdot \frac{P_{max}}{t_{er}^I} \frac{m_{np} g}{c} \quad (2.81)$$

Початкові умови I етапу $t_{(n)}^I = 0$; $x_{(n)}^I = \frac{m_{np} g}{c}$; $\dot{x}_{(n)}^I = 0$.

Тоді за $t_{(n)}^I = 0$ одержуємо

$$\frac{m_{np} g}{c} = B + \frac{m_{np} g}{c}; \quad B = 0 \quad (2.82)$$

$$\dot{x} = A \sqrt{\frac{c}{m_{np}}} \cos \sqrt{\frac{c}{m_{np}}} t - B \sqrt{\frac{c}{m_{np}}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_{np}}} t + \frac{F}{c} \cdot \frac{P_{max}}{t_{er}^I} \quad (2.83)$$

Звідси

$$\dot{x}_{(n)} = 0 = A \sqrt{\frac{c}{m_{np}}} + \frac{F}{c} \cdot \frac{P_{max}}{t_{er}^I}; \quad (2.84)$$

$$A = -\frac{F}{c} \cdot \frac{P_{max}}{t_{er}^I} \sqrt{\frac{m_{np}}{c}}.$$

Тоді остаточно записуємо

$$x = \frac{F}{c} \cdot \frac{P_{\max}}{t_{\text{ет}}^I} t - \frac{F}{c} \cdot \frac{P_{\max}}{t_{\text{ет}}^I} \sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{c}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t + \frac{m_{\text{пр}} g}{c} \quad (2.85)$$

Диференціюванням останнього виразу визначимо швидкість деформації газорідного шару

$$\dot{x} = \frac{F}{c} \cdot \frac{P_{\max}}{t_{\text{ет}}^I} - \frac{F}{c} \cdot \frac{P_{\max}}{t_{\text{ет}}^I} \cos \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t \quad (2.86)$$

Завершенню I етапу відповідають умови

$$x_{(k)}^I = \frac{F}{c} P_{\max} - \frac{F}{c} \cdot \frac{P_{\max}}{t_{\text{ет}}^I} \sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{c}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t_{(k)}^I + \frac{m_{\text{пр}} g}{c} \quad (2.87)$$

$$\dot{x}_{(k)}^I = \frac{F}{c} \cdot \frac{P_{\max}}{t_{\text{ет}}^I} - \frac{F}{c} \cdot \frac{P_{\max}}{t_{\text{ет}}^I} \cos \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t_{(k)}^I \quad (2.88)$$

Відмітимо, що у числовому значенні величини $t_{\text{ет}}^I$ і $t_{(k)}^I$ збігаються.

Початкові умови другого етапу

$$t_{(n)}^{II} = 0; \quad x_{(n)}^{II} = x_{(n)}^I; \quad \dot{x}_{(n)}^{II} = \dot{x}_{(k)}^I \quad (2.89)$$

Рівняння руху приведеної маси на другому етапі

$$m_{\text{пр}} \ddot{x} = F P_{\max} - \frac{F P_{\max}}{t_{\text{ет}}^{II}} t + m_{\text{пр}} g - c x \quad (2.90)$$

Тоді

$$\ddot{x} + \frac{c}{m_{\text{пр}}} x = \frac{FP_{\text{max}}}{m_{\text{пр}}} - \frac{FP_{\text{max}}}{m_{\text{пр}} t_{\text{ет}}^{\text{II}}} t + g \quad (2.91)$$

$$x = A_2 \sin \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t + B_2 \cos \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t + \frac{FP_{\text{max}}}{c} - \frac{FP_{\text{max}}}{c t_{\text{ет}}^{\text{II}}} t + \frac{m_{\text{пр}} g}{c} \quad (2.92)$$

Визначаємо сталі інтегрування A_2 та B_2 :

$$x_{(\text{II})}^{\text{II}} = x_{(\text{к})}^{\text{I}} = B_2 + \frac{FP_{\text{max}}}{c} \frac{m_{\text{пр}} g}{c} \quad (2.93)$$

$$B_2 = x_{(\text{к})}^{\text{I}} - \frac{FP_{\text{пр max}}}{c}$$

Диференціювання виразу (2.92) дозволяє записати

$$\dot{x} = A_2 \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} \cos \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t - B_2 \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t - \frac{FP_{\text{max}}}{c t_{\text{ет}}^{\text{II}}} \quad (2.94)$$

$$\dot{x}_{(\text{II})}^{\text{II}} = \dot{x}_{(\text{к})}^{\text{I}} = A_2 \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} - \frac{FP_{\text{max}}}{c t_{\text{ет}}^{\text{II}}} \quad (2.95)$$

$$A_2 = \left(\dot{x}_{(\text{к})}^{\text{I}} + \frac{FP_{\text{max}}}{c t_{\text{ет}}^{\text{II}}} \right) \sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{c}}$$

Таким чином остаточно маємо:

$$x = \left(\dot{x}_{(\text{к})}^{\text{I}} + \frac{FP_{\text{max}}}{c t_{\text{ет}}^{\text{II}}} \right) \sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{c}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t + \left(x_{(\text{к})}^{\text{I}} - \frac{FP_{\text{max}} - m_{\text{пр}} g}{c} \right) \cdot \cos \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t + \frac{FP_{\text{max}}}{c} - \frac{FP_{\text{max}}}{c t_{\text{ет}}^{\text{II}}} t + \frac{m_{\text{пр}} g}{c} \quad (2.96)$$

Динаміка зміни тиску в системі визначається за формулою

$$P_{\text{дин}} = \left(\dot{x}_{(\kappa)}^I + \frac{FP_{\text{max}}}{c t_{\text{ет}}^{\text{II}}} \right) \frac{\sqrt{m_{\text{пр}} c}}{F} \sin \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t + (x_{(\kappa)}^I c - FP_{\text{max}} + mg) \frac{\cos \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t}{F} + P_{\text{max}} - \frac{P_{\text{max}}}{t_{\text{ет}}^{\text{II}}} t + \frac{mg}{F}. \quad (2.97)$$

Завершенню другого етапу відповідають умови

$$x_{(\kappa)}^{\text{II}} = \left(\dot{x}_{(\kappa)}^I + \frac{FP_{\text{max}}}{c t_{\text{ет}}^{\text{II}}} \right) \sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{c}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t_{(\kappa)}^{\text{II}} + \left(x_{(\kappa)}^I - \frac{FP_{\text{max}} - mg}{c} \right) \cos \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t_{(\kappa)}^{\text{II}} + \frac{mg}{c}. \quad (2.98)$$

$$\dot{x}_{(\kappa)}^{\text{II}} = \left(\dot{x}_{(\kappa)}^I + \frac{FP_{\text{max}}}{c t_{\text{ет}}^{\text{II}}} \right) \cos \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t_{(\kappa)}^{\text{II}} - \left(x_{(\kappa)}^I - \frac{FP_{\text{max}} - mg}{c} \right) \times \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} \sin \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t_{(\kappa)}^{\text{II}} - \frac{FP_{\text{max}}}{c t_{\text{ет}}^{\text{II}}}. \quad (2.99)$$

Кінцеве значення тиску на момент завершення другого етапу

$$P_{\text{дин}(\kappa)} = \left(\dot{x}_{(\kappa)}^I + \frac{FP_{\text{max}}}{c t_{\text{ет}}^{\text{II}}} \right) \frac{\sqrt{m_{\text{пр}} c}}{F} \sin \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t_{(\kappa)}^{\text{II}} + (x_{(\kappa)}^I c - FP_{\text{max}} + mg) \frac{\cos \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t_{(\kappa)}^{\text{II}}}{F} + \frac{mg}{F}. \quad (2.100)$$

Оскільки в цій частині дослідження час перебігу першого і другого етапів призначався довільно, то це означає можливість виникнення коливальних процесів як по кінематичним, так і по динамічним параметрам. У зв'язку з цим є

інтерес щодо екстремумів тисків і цей інтерес подвійний. По-перше, самі зміни тисків означають зміни гідродинамічного стану середовища, а, по-друге, важливе значення можуть мати і нижні значення тисків та можливості переходу рідинної фази у метастабільний стан. Очевидно, що для відповіді на останній запит слід дослідити на екстремуми рівняння (2.97). У зв'язку з цим виконаємо його диференціювання:

$$\begin{aligned} \dot{P}_{\text{дин}} &= \left(\dot{x}_{(к)}^I + \frac{FP_{\text{max}}}{c t_{\text{ет}}^{\text{II}}} \right) \frac{c}{F} \cos \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t_{\text{ек}} - \\ &- \left(x_{(к)}^I c - FP_{\text{max}} + mg \right) \frac{\sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}}}{F} \sin \sqrt{\frac{c}{m_{\text{пр}}}} t_{\text{ек}} - \frac{P_{\text{max}}}{t_{\text{ет}}^{\text{II}}} = 0. \end{aligned} \quad (2.101)$$

2.4. Динаміка газорідинної системи за синусоїдального закону зміни тиску

До впливів на газорідинну систему відносяться закони зміни тиску. Припустимо, що маємо синусоїдальний закон у формі

$$P_2 F = P \sin \omega_{\text{max}}, \quad (2.102)$$

де ω – частота збурюючих коливань.

Не враховуючи дисипативні явища, запишемо

$$m_{\text{пр}} \ddot{x} = P \sin \omega_{\text{прmax}}, \text{ або } \ddot{x} + \frac{c}{m_{\text{пр}}} x = \frac{P_{\text{max}}}{m_{\text{пр}} \sin \omega} \quad (2.103)$$

Після врахування дисипативних властивостей системи диференціальне рівняння змушуваних коливань записується у формі

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + k^2 x = h \sin(\omega t + \alpha), \quad (2.104)$$

$$\text{де } 2n = \frac{\beta}{m_{\text{пр}}}; \quad k^2 = \frac{c}{m_{\text{пр}}}; \quad h = \frac{P_{\text{max}}}{m_{\text{пр}}}.$$

Тоді рівняння руху приведеної маси буде мати форму

$$x = x_1 + x^*, \quad (2.105)$$

де x_1 – загальне розв'язання відповідного однорідного диференціального рівняння;

x^* – часткове розв'язання неоднорідного диференціального рівняння.

Розв'язання x_1 в залежності від співвідношень $n < k$, $n > k$ та $n = k$ визначають відповідно випадки малого опору, великого опору і граничний випадок.

Часткове розв'язання x^* , що визначає характер збурюючих впливів:

$$x^* = a \sin(\omega t + \alpha - \varepsilon) \quad (2.106)$$

де

$$a = \frac{h}{\sqrt{(k^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}}; \quad (2.107)$$

$$\varepsilon = \operatorname{arctg} \frac{2n\omega}{k^2 - \omega^2}. \quad (2.108)$$

Введемо позначку

$$A(t) = \frac{h}{\sqrt{(k^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}} \sin(\omega t + \alpha - \varepsilon). \quad (2.109)$$

Тоді в залежності від співвідношень n і k одержуємо розв'язання рівняння (2.104) у такій формі;

$$x = \begin{cases} e^{-nt} (C_1 \sin \sqrt{k^2 - \omega^2} t + C_2 \cos \sqrt{k^2 - \omega^2} t) + A(t) & \text{при } n < k; \\ e^{-nt} (C_1 + C_2 t) + A(t) & \text{при } n = k; \\ e^{-nt} (C_1 e^{\sqrt{k^2 - \omega^2} t} + C_2 e^{-\sqrt{k^2 - \omega^2} t}) + A(t) & \text{при } n > k. \end{cases} \quad (2.110)$$

Сталі інтегрування C_1 та C_2 визначаються за заданими початковими умовами:

$$t_{(n)} = 0; \quad x_{(n)} = x_0; \quad \dot{x}_{(n)} = \dot{x}_0. \quad (2.111)$$

У зв'язку з тим, що до умов (2.110) входить складова e^{-nt} , то це означає, що переміщення x_1 швидко затухають. В той же час амплітуда збуджуючих коливань a , кругова частота зовнішніх впливів ω і зсув між фазами ϵ від часу не залежать.

Кругова частота ω збуджуючих коливань x^* дорівнює круговій частоті збуджуючої сили. Це означає, що сила опору руху пропорційна першій степені швидкості, не впливає на величину кругової частоти збуджених коливань системи.

За резонансу ($\omega = t$) змінна амплітуда збуджених коливань a у відсутності сили опору необмежено зростає за законом

$$a = \frac{h}{2k} t. \quad (2.112)$$

Залежність коефіцієнта динамічності k_d від коефіцієнта $z = \omega/k$ у відповідності з одержаними даними

$$k_d = \frac{1}{\sqrt{(1-z^2)^2 + 4v^2 z^2}}, \quad (2.113)$$

де $v = n/k$.

Зі збільшенням параметра v , тобто зі збільшенням сили опору, коефіцієнт динамічності k_d зростає і відповідно амплітуди вимушених коливань зменшуються.

Аналіз залежності (2.113) вказує разом з цим на те, що у зоні коливань значної частоти у віддалені від резонансної (наприклад при $z > 3$) при обчисленні амплітуди вимушених коливань силою опору можна знехтувати.

Як було показано раніше, частоти власних коливань газорідинних систем залежать від газотримувальної здатності, діапазону зміни тисків і геометричних параметрів шару і мають значення на рівнях, наближення до яких частот вимушених коливань може супроводжуватися технічними складнощами. Тим не менш, враховуючи величезну кількість різнотипів масообмінних апаратів, слід очікувати широких можливостей застосування технологій, в яких реалізується наближення до створення коефіцієнта динамічності k_d до можливого максимуму, який дещо зміщений в зону $z < 1$:

$$z\sqrt{1 - 2v^2}_{\max}; \quad (2.114)$$

$$k \frac{1}{2v\sqrt{1-v^2}}_{\text{д max}} \quad (2.115)$$

За значення $v \geq \sqrt{2}/2$ функція $k_{\text{д}}=k_{\text{д}}(z)$ монотонно зменшується.

Зсув між фазами $\varepsilon = \arctg(2vz/(1 - z^2))$ збурюючої сили і викликаних нею вимушених коливань за резонансу залишається сталим і $\varepsilon = \pi/2$. Зсув між фазами зі зростанням сил опору (тобто v) зростає в зоні вимушених коливань малої частоти і зменшується в зоні вимушених коливань більших частот.

2.5. Планування і постановка обчислювальних експериментів

З аналізу одержаних теоретичних моделей можливо зробити висновок щодо переліку параметрів впливу на динаміку коливальних процесів у газорідному середовищі при дії обертових валків. Стосовно нових розроблених конструкцій валків відносяться закони зміни тиску і максимальний кінцевий тиск, геометричні параметри їх поверхні, газоутримувальна здатність тіста, маса, параметри дисипативних явищ тощо.

Зі вказаного переліку, очевидно, можливо визначити параметри. Їх значення можливо стабілізувати на певному рівні, а подальші дослідження виконати стосовно впливу величин, що можуть бути віднесені до факторів впливу.

Для встановлення загальних закономірностей і меж зміни параметрів впливів виконано попередні розрахунки у відносно широкому стохастичному наборі даних щодо законів зміни тисків $P_2 = P_2(t)$, часу перебігу перехідних процесів та коефіцієнтів затухання.

Крім вказаних параметрів тиску і часу перебігу процесів в якості регульованого параметру впливу на систему слід розглядати газоутримувальна здатність u_1 , яка за інших рівних умов визначається інтенсивністю бродіння. Інші параметри системи вважаємо стабілізованими.

Наведені міркування приводять до висновку про необхідність постановки трифакторного обчислювального експерименту. Дані, що стосуються умов проведення експериментів наведено в табл. 2.1.

Матрицю планування повного факторного експерименту за участю трьох факторів впливу представлено у табл. 2.2.

Повний факторний експеримент відповідає постановці 8 дослідів з відповідним перебором максимумів і мінімумів факторів.

Величини інших стабілізованих факторів мали наступні значення:
 $P_1=0,1 \cdot 10^6 \text{Па}$; $F=20 \text{м}^2$; $m_{\text{пр}}=23.300 \text{кг}$; $g=9,81 \text{м/с}^2$.

Таблиця 2.1

Характеристики параметрів системи

Величина	Фактори		
	Максимальний тиск, Па	Час перебігу, с	Газоутримувальна здатність, м ³
Кодове позначення фактора	z_1	z_2	z_3
Основний рівень z_i^0	$0,125 \cdot 10^6$	3,0	30
Інтервал варіювання	$0,015 \cdot 10^6$	2,0	10
Нижній рівень $z_{i \text{ н}}$	$0,11 \cdot 10^6$	1,0	20
Верхній рівень $z_{i \text{ в}}$	$0,14 \cdot 10^6$	5,0	40

Значення жорсткості визначалося за формулою (2.7), а початкові умови записувалися як

$$t_{(п)} = 0; \quad x_{(п)} = (mg + P_1 F)c; \quad \dot{x}_{(п)} = 0. \quad (2.116)$$

Рівняння руху записувалося у формі

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + ktF}{m} + g - \frac{cx}{m} - \dot{x}. \quad (2.117)$$

У рівнянні (2.117) складова \dot{x} записана з коефіцієнтом $\beta/m = 1$. Значення коефіцієнта пропорційності k визначалося з умови

$$k = \frac{P_2 - P_1}{t_{(к)}}, \text{ Па/с}, \quad (2.118)$$

де $t_{(к)}$ – час перехідного процесу.

Так у відповідності з планом-матрицею у першому досліді призначено $P_2=0,11 \text{ МПа}=0,11 \cdot 10^6 \text{ Па}$, а час $t_{(к)}=1 \text{ с}$.

Таблиця 2.2

Матриця планування трифакторного експерименту і значення функцій відгуку

№ досліді	Фактори				Максимальні значення функцій відгуку		
	Z ₀	Z ₁	Z ₂	Z ₃	X _{max} , М	\dot{x}_{max} , М/с	P, Па
1	+	-	-	-	0,09372	0,00323	$1,134 \cdot 10^5$
2	+	+	-	-	0,1	0,00322	$1,21 \cdot 10^5$
3	+	-	+	-	0,31	0,16	$1,5 \cdot 10^5$
4	+	+	+	-	0,31	0,0314	$1,51 \cdot 10^5$
5	+	-	-	+	0,201	0,032	$1,22 \cdot 10^5$
6	+	+	-	+	0,201	0,0064	$1,21 \cdot 10^5$
7	+	-	+	+	0,61	0,31	$1,5 \cdot 10^5$
8	+	+	+	+	0,62	0,062	$1,51 \cdot 10^5$

Тоді

$$k = \frac{(0,11-0,10) \cdot 10^6}{1} = 0,01 \cdot 10^6; \ddot{x} = \frac{0,1 \cdot 10^6 F + 0,01 \cdot 10^6 Ft}{m} + g - \frac{cx}{m} - \dot{x}. \quad (2.119)$$

У другому досліді маємо $P_2=0,11 \cdot 10^6 \text{ Па}$ і час $t_{(к)}=5 \text{ с}$.

Тоді

$$k = \frac{(0,11-0,10) \cdot 10^6}{5} = 0,002 \cdot 10^6; \quad (2.120)$$

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,002 \cdot 10^6 Ft}{m} + g - \frac{cx}{m} - \dot{x}$$

Відповідно у третьому досліді $P_2=0,14 \cdot 10^6 \text{ Па}$, час $t_{(к)}=1 \text{ с}$:

$$k = \frac{(0,14 - 0,10) \cdot 10^6}{1} = 0,04 \cdot 10^6; \quad (2.121)$$

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,04 \cdot 10^6 Ft}{m} + g - \frac{cx}{m} - \dot{x}.$$

Для четвертого досліді $P_2=0,14 \cdot 10^6$ Па, час $t_{(к)}=5$ с:

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,008 \cdot 10^6 F t}{m} + g - \frac{c x}{m} - \dot{x}. \quad (2.122)$$

У п'ятому досліді $P_2=0,11 \cdot 10^6$ Па, час $t_{(к)}=1$ с:

$$k = \frac{(0,11-0,10) \cdot 10^6}{1} = 0,01 \cdot 10^6; \quad (2.123)$$

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,01 \cdot 10^6 F t}{m} + g - \frac{c x}{m} - \dot{x}.$$

Для шостого досліді маємо $P_2=0,11 \cdot 10^6$ Па, час $t_{(к)}=5$ с:

$$k = \frac{(0,11-0,10) \cdot 10^6}{5} = 0,002 \cdot 10^6; \quad (2.124)$$

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,002 \cdot 10^6 F t}{m} + g - \frac{c x}{m} - \dot{x}.$$

У сьомому досліді співвідношення мають вид: $P_2=0,14 \cdot 10^6$ Па, час $t_{(к)}=1$ с:

$$k = \frac{(0,14-0,10) \cdot 10^6}{1} = 0,04 \cdot 10^6; \quad (2.125)$$

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,04 \cdot 10^6 F t}{m} + g - \frac{c x}{m} - \dot{x}.$$

У восьмому досліді: $P_2=0,14 \cdot 10^6$ Па, час $t_{(к)}=5$ с:

$$k = \frac{(0,14-0,10) \cdot 10^6}{5} = 0,008 \cdot 10^6; \quad (2.126)$$

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,008 \cdot 10^6 F t}{m} + g - \frac{c x}{m} - \dot{x}.$$

Функціями відгуку системи обрано значення максимальних переміщень (деформації шару) x_{\max} , максимальної швидкості деформації \dot{x}_{\max} та максимальні тиски P_{\max} в середовищі.

У групі з 8 дослідів кожен з факторів приймав верхні і нижні значення. Так максимальним тискам P_2 відповідали досліди № 3, 4, 7 та 8. Саме у цих випадках досягалися максимальна деформація газорідного шару. При цьому у досліді № 3 і 4 вона приблизно вдвічі менша за деформацію у досліді № 7 та 8 за відповідних співвідношень газоутримувальної здатності. У перших двох випадках вона складала 20, а в останніх випадках – 40 м³.

Оскільки деформації безпосередньо пов'язані з тисками, то вказаним дослідом відповідають і максимальні значення тисків. На показники максимальних тисків відносно мало впливав час перебігу перехідного процесу. Однак останній мав суттєвий вплив на показник швидкості деформації \dot{x}_{\max} . За даними табл. 2.2 також можливо зробити висновок про взаємний вплив на показник \dot{x}_{\max} , як часу перебігу, так і значення тиску P_2 .

Значення величин деформації газорідного шару дають можливість підрахувати зміну величини газоутримувальної здатності Δu в об'ємному обчисленні $\Delta u = xF$.

Разом з тим без врахування інерційних і коливальних процесів зміну Δu можливо визначити за умов ізотермічного процесу стискання суміші

$$\Delta u = u_1 - u_2 = u_1 - u_1 \frac{P_1}{P_2} = u_1 \left(1 - \frac{P_1}{P_2} \right) \quad (2.127)$$

Співвідношення даних щодо зміни газоутримувальної здатності Δu наведені в табл. 2.3.

Як бачимо з табл. 2.3, величини деформацій газової фази, що є складовою газорідної суміші, за результатами динамічних розрахунків переважають відповідні результати щодо ізотермічного стискання. При цьому різниця в значеннях Δu збільшується зі зростанням амплітуди тиску P_2 і початкового значення газоутримувальної здатності u_1 .

Таблиця 2.3

Дані значень газотримувальної здатності Δu

№ дослідю	Значення Δu , м ³		
	За даними динамічних розрахунків	За даними ізотермічного процесу	Різниця даних
1	1,8744	1,819	0,0554
2	2,0	1,819	0,181
3	6,2	5,714	0,486
4	6,2	5,714	0,486
5	4,02	3,636	0,384
6	4,02	3,636	0,384
7	12,2	11,43	0,77
8	12,4	11,43	0,97

Подальший аналіз результатів табл. 2.2 пов'язаний зі статичною обробкою і одержанням рівнянь регресій.

Наступний обчислювальний експеримент стосується динаміки газорідної суміші в умовах синусоїдальної зміни зовнішньої сили. Для можливості порівняння нових даних з результатами попереднього обчислювального експерименту закон зміни тиску P приймемо таким:

$$P=P_1+A\sin\omega t, \quad (2.128)$$

де A – амплітуда динамічної складової тиску зі значеннями у двох рівнях $A_{\min}=0,01 \cdot 10^6 \text{Па}$ та $A_{\max}=0,04 \cdot 10^6 \text{Па}$.

Тоді рівняння руху у загальному описі приводиться до форми

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + k^2x = \frac{P_1F}{m} + \frac{AF}{m} \sin \omega t, \quad (2.129)$$

де частота власних кругових коливань системи має визначатися з урахуванням параметрів k та n і при цьому:

$$f = \sqrt{k^2 - n^2} = \sqrt{\frac{c}{m} - \frac{\beta^2}{4m^2}}. \quad (2.130)$$

Оскільки цією групою досліджень ставиться завдання оцінити гідродинаміку системи в умовах наближених до резонансу, то до числа факторів впливу віднесемо кругову частоту зовнішніх збурень ω .

До числа незалежних факторів, які можуть змінюватися стосовно технологічного процесу віднесено амплітуди динамічних тисків A (або максимуми загальних тисків), газоутримувальна здатність u_1 та частота зовнішніх впливів ω . З точки зору інтересів теорії подібних систем має оцінка впливів параметру n , що комплексно представляє дисипативні властивості системи. Але включення його до числа незалежних факторів неможливо, оскільки його зміна в переборі параметрів тягне за собою необхідність зміни частоти збурюючих коливань за межами визначених інтервалів варіювання ω .

У зв'язку з відміченим порушується алгоритм зміни параметрів у багатофакторному обчислювальному експерименті і вимагає перегляду технологія розрахунків. Останнє приводить до висновку про доцільність стабілізації параметру n на певному рівні. Дані, що стосуються параметрів впливу і інтервалів їх варіювання, наведено в табл. 2.4.

Матрицю планування і значення максимальних кінематичних і динамічних параметрів, як функцій відгуку, представлено у табл. 2.5.

Величини інших факторів, які є складовими експерименту мали значення однакові з попереднім обчислювальним експериментом. Розрахунки виконувалися у двох серіях зі значеннями $n=0,5$ та $n=2,5$ відповідно.

Таблиця 2.4

Характеристики параметрів системи в обчислювальному експерименті з наближенням до умов резонансу

Величина	Фактори		
	Частота збурень, с ⁻¹	Зовнішні тиски, Па	Газоутримувальна здатність, м ³
Кодове позначення фактора	z_1	z_2	z_3
Основний рівень, z_i^0	$\omega_{рез}$	$0,125 \cdot 10^6$	30
Інтервал варіювання	$0,1\omega_{рез}$	$0,015 \cdot 10^6$	10
Нижній рівень, $z_{ін}$	$0,9\omega_{рез}$	$0,11 \cdot 10^6$	20
Верхній рівень, $z_{ів}$	$1,1\omega_{рез}$	$0,14 \cdot 10^6$	40

У зв'язку з останнім, резонансна частота

$$\omega_{рез} = \sqrt{\frac{c}{m} - n^2}. \quad (2.131)$$

Одержане значення приймаємо за основний рівень фактора z_1 (частоти збурень), а інтервал варіювання приймемо зі значенням 10 % від величини $\omega_{рез}$.

У зв'язку з відміченим, обчислення резонансної частоти повинно входити до алгоритму розрахунків.

Рівняння руху відповідно до зазначеного стосовно першого досліді записуємо у формі:

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,01 \cdot 10^6 F \sin(0,9\omega_{рез} t)}{m} - 2n\dot{x} - \frac{c}{m} x + g \quad (2.132)$$

Для другого досліді у відповідності з матрицею планування одержуємо

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,01 \cdot 10^6 F \sin(1,1\omega_{\text{рез}} t)}{m} - 2n\dot{x} - \frac{c}{m}x + g \quad (2.133)$$

Таблиця 2.5

**Матриця планування трифакторного експерименту
і значення функцій відгуку**

№ дослід у	Фактори				Максимуми значень функцій		
	Z ₀	Z ₁	Z ₂	Z ₃	X _{max} , М	\dot{x}_{max} , М/с	P, Па
1	+	-	-	-	0,159	2,026	1,925·10 ⁵
2	+	+	-	-	0,157	2,228	1,904·10 ⁵
3	+	-	+	-	0,82	11,45	4,036·10 ⁵
4	+	+	+	-	0,81	12,557	3,961·10 ⁵
5	+	-	-	+	0,308	2,65	1,886·10 ⁵
6	+	+	-	+	0,31	2,9	1,85·10 ⁵
7	+	-	+	+	1,524	14,45	3,73·10 ⁵
8	+	+	+	+	1,49	15,98	3,65·10 ⁵

У випадку третього дослідження рівняння руху записується у формі

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,04 \cdot 10^6 F \sin(0,9\omega_{\text{рез}} t)}{m} - 2n\dot{x} - \frac{c}{m}x + g \quad (2.134)$$

Для четвертого дослідження маємо

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,04 \cdot 10^6 F \sin(1,1\omega_{\text{рез}} t)}{m} - 2n\dot{x} - \frac{c}{m}x + g \quad (2.135)$$

П'ятий дослід супроводжується рівнянням:

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,01 \cdot 10^6 F \sin(0,9\omega_{рез}t)}{m} - 2n\dot{x} - \frac{c}{m}x + g \quad (2.136)$$

Для шостого дослідження маємо:

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,01 \cdot 10^6 F \sin(1,1\omega_{рез}t)}{m} - 2n\dot{x} - \frac{c}{m}x + g \quad (2.137)$$

Сьомий дослід відображується рівнянням:

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,04 \cdot 10^6 F \sin(0,9\omega_{рез}t)}{m} - 2n\dot{x} - \frac{c}{m}x + g \quad (2.138)$$

Рівняння руху восьмого дослідження має форму:

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,04 \cdot 10^6 F \sin(1,1\omega_{рез}t)}{m} - 2n\dot{x} - \frac{c}{m}x + g \quad (2.139)$$

Практична реалізація частоти $\omega_{рез}$ при вибраних параметрах систем може бути суттєво ускладнена за технічними можливостями, які вимагають періоду зміни до кількох секунд або навіть десятків секунд. Наприклад, за газотримувальної здатності $u_1=40\text{м}^3$ і $P_{2\text{max}}=0,14 \cdot 10^6$ Па період власних коливань системи складає 0,433 с. У зв'язку з тим, що резонансні коливання досягаються і за умов кратності частот власних і збурюючих коливань, то зменшення $\omega_{рез}$ можливе у певному співвідношенні. Так зменшення $\omega_{рез}$ у 10 разів відповідно подовжить у 10 разів період зміни зовнішніх збурень, що стане більшим 4 с.

Проте, в цьому випадку слід очікувати суттєвих впливів дисипативних явищ, які цілком логічно можуть стати на шляху досягнення резонансних

коливань. У зв'язку з цим виникає необхідність повторення обчислювального експерименту в нових умовах визначення частоти збурюючих коливань.

Виберемо відношення частот

$$\frac{k}{\phi_{кр}} = \omega_{рез}, \quad (2.140)$$

де $\phi_{кр}$ – коефіцієнт кратності частот.

Якщо прийняти $\phi_{кр}=10$, то $\omega_{рез}=0,1k$. Здійснення такого переходу і визначення

$$\omega_{рез} = 0,1 \sqrt{\frac{c}{m}}, \quad (2.141)$$

приводить до змін у рівняннях руху, що стосується набору з 8 дослідів. Перехід до умови (2.141) визначає необхідність зміни інтервалів варіювання у змінах частоти збурень. Якщо за основний рівень прийняти значення $\omega_{рез}$ за умовою (2.141), то нижній рівень обмежимо величиною 1%, тобто

$$\omega_{min} = 0,99 \cdot 0,1 \sqrt{\frac{c}{m}} = 0,099 \sqrt{\frac{c}{m}},$$

а верхній рівень відповідно становитиме:

$$\omega_{max} = 1,01 \cdot 0,1 \sqrt{\frac{c}{m}} = 0,101 \sqrt{\frac{c}{m}}.$$

З врахуванням відміченого для наступної серії дослідів маємо такі рівняння руху:

- дослід перший

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,01 \cdot 10^6 F \sin(0,099 \omega_{\text{рез}} t)}{m} - 2n\dot{x} - \frac{c}{m}x + g. \quad (2.142)$$

- дослід другий

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,01 \cdot 10^6 F \sin(0,101 \omega_{\text{рез}} t)}{m} - 2n\dot{x} - \frac{c}{m}x + g. \quad (2.143)$$

- дослід третій

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,04 \cdot 10^6 F \sin(0,099 \omega_{\text{рез}} t)}{m} - 2n\dot{x} - \frac{c}{m}x + g. \quad (2.144)$$

- дослід четвертий

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,04 \cdot 10^6 F \sin(0,101 \omega_{\text{рез}} t)}{m} - 2n\dot{x} - \frac{c}{m}x + g. \quad (2.145)$$

- дослід п'ятий

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,01 \cdot 10^6 F \sin(0,099 \omega_{\text{рез}} t)}{m} - 2n\dot{x} - \frac{c}{m}x + g. \quad (2.146)$$

- дослід шостий

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,01 \cdot 10^6 F \sin(0,101 \omega_{рез} t)}{m} - 2n\dot{x} - \frac{c}{m}x + g. \quad (2.147)$$

- дослід сьомий

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,04 \cdot 10^6 F \sin(0,099 \omega_{рез} t)}{m} - 2n\dot{x} - \frac{c}{m}x + g. \quad (2.148)$$

- дослід восьмий

$$\ddot{x} = \frac{P_1 F + 0,04 \cdot 10^6 F \sin(0,101 \omega_{рез} t)}{m} - 2n\dot{x} - \frac{c}{m}x + g. \quad (2.149)$$

Початкові умови в двох останніх серіях досліджень приймаємо відповідними умовам (2.116). Результати цієї групи досліджень по максимальним значенням функцій відгуку представлені у табл. 2.6.

Таблиця 2.6

**Максимальні значення кінематичних параметрів
коливальних процесів і тиску в системі для випадку з
частотою зовнішніх збурень, кратною частоті
власних коливань**

№ дослідду	Значення параметрів		
	x_{max}, M	$\dot{x}_{max}, M/c$	P, Pa
1	0,101	0,051	$1,22 \cdot 10^5$
2	0,101	0,052	$1,22 \cdot 10^5$

Продовження Таблиці 2.6

№ дослід	Значення параметрів		
	X_{\max} , М	\dot{X}_{\max} , М/с	Р, Па
3	0,31	0,31	$1,54 \cdot 10^5$
4	0,31	0,32	$1,54 \cdot 10^5$
5	0,202	0,071	$1,22 \cdot 10^5$
6	0,202	0,0727	$1,22 \cdot 10^5$
7	0,63	0,44	$1,54 \cdot 10^5$
8	0,63	0,446	$1,54 \cdot 10^5$

Виконаємо порівняльний аналіз одержаних результатів.

Перехід до випадку, що відповідає 10% відхиленню частоти зовнішніх збурень від резонансної показав суттєве зростання амплітуд кінематичних параметрів і тисків порівняно з випадком лінійного закону зростання зовнішніх тисків, хоча амплітуди динамічних складових навантажень були однаковими.

Кратність зростання максимальних тисків по вказаних випадках відображено у табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Кратність зростання тисків у порівнюваних дослід

	Номери дослідів							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Кратність відношень P_{\max}	1,69	1,57	2,69	2,62	1,54	1,52	2,49	2,41

Як бачимо з останньої таблиці, наближення до резонансної частоти у зміні зовнішніх тисків приводить до помітного зростання амплітуд тисків. Цілком логічно стосовно цього явища зростають амплітуди швидкостей у перебігу перехідних процесів.

З точки зору інтересів динаміки системи має сенс порівняння статичних і динамічних складових навантажень у порівнюваних дослід. Результати таких порівнянь наведені у табл. 2.8.

Найменші прирощення динамічних складових навантажень мали місце у першій групі дослідів, а найбільші – у другій. При цьому з другої групи дослідів видно, що прирощення тисків у вигляді динамічних складових суттєво залежать від прирощення тиску зовнішнього збурення. У третій групі дослідів прирощення динамічних складових переважають аналогічні показники першої групи, однак з віддаленням від резонансної частоти зовнішніх збурень динамічні складові тисків суттєво поступаються другій групі.

Таблиця 2.8

Результати порівняння динамічних і статичних складових тисків в трьох групах обчислювальних експериментів

п/п	Закони зміни тисків								
	$P=P_1F+kFt$, Па			$P=P_1F+kF\sin((0,9-1,1)\omega_{рез}t)$, Па			$P=P_1F+kF\sin((0,099-0,11)\omega_{рез}t)$, Па		
	$P_{дин}$	$P_{стат}$	$\frac{P_{дин}}{P_{стат}}$	$P_{дин}$	$P_{стат}$	$\frac{P_{дин}}{P_{стат}}$	$P_{дин}$	$P_{стат}$	$\frac{P_{дин}}{P_{стат}}$
	$0,034 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	0,034	$0,925 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	0,925	$0,22 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	0,22
	$0,11 \cdot 10^5$	– " –	0,11	$0,904 \cdot 10^5$	– " –	0,904	$0,22 \cdot 10^5$	– " –	0,22
	$0,1 \cdot 10^5$	– " –	0,1	$2,636 \cdot 10^5$	– " –	2,636	$0,14 \cdot 10^5$	– " –	0,14
	$0,11 \cdot 10^5$	– " –	0,11	$2,561 \cdot 10^5$	– " –	2,561	$0,14 \cdot 10^5$	– " –	0,14
	$0,12 \cdot 10^5$	– " –	0,12	$0,886 \cdot 10^5$	– " –	0,886	$0,22 \cdot 10^5$	– " –	0,22
	$0,11 \cdot 10^5$	– " –	0,11	$0,85 \cdot 10^5$	– " –	0,85	$0,22 \cdot 10^5$	– " –	0,22
	$0,1 \cdot 10^5$	– " –	0,1	$2,33 \cdot 10^5$	– " –	2,33	$0,14 \cdot 10^5$	– " –	0,14
	$0,11 \cdot 10^5$	– " –	0,11	$2,25 \cdot 10^5$	– " –	2,25	$0,14 \cdot 10^5$	– " –	0,14

З метою поглибленого аналізу впливів частот зовнішніх збурень і дисипативних явищ звернемося до результатів розрахунків, представлених на рис. 2.7–2.9.

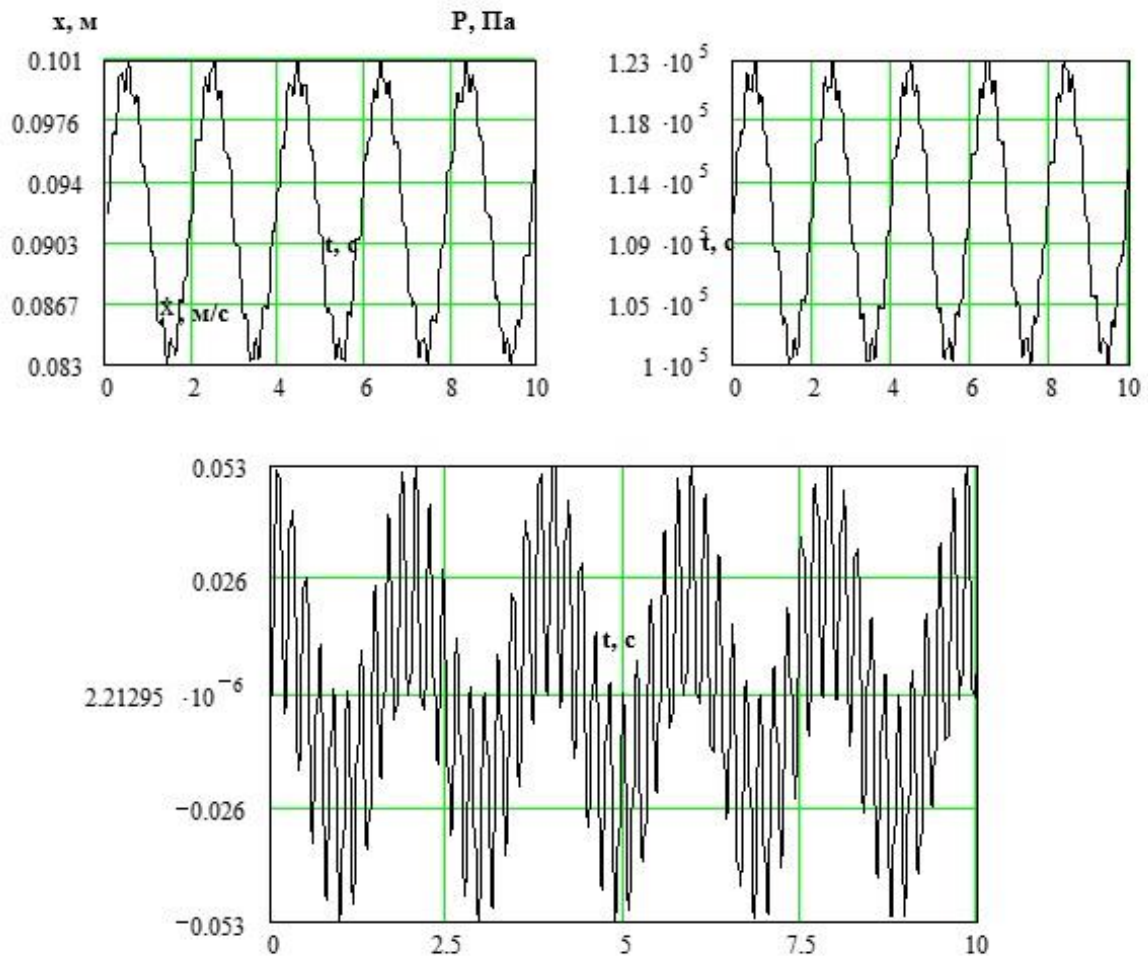


Рис. 2.7. Результати розрахунків по визначенню кінематичних параметрів деформації і тиску газорідинної системи за нехтування дисипативними явищами і десятикратним віддаленням частоти зовнішніх впливів від резонансної

Результати розрахунків по рис. 2.7 стосуються випадку з амплітудою динамічної складової $0,01 \cdot 10^6$ Па за десятикратного віддалення частоти зовнішніх збурень від резонансної і за неврахування дисипативних явищ. У зв'язку з останнім маємо незатухаючий характер коливальних процесів. Віддалення від резонансної зони обмежує амплітуди кінематичних параметрів і змін тиску, що добре видно у порівнянні цих параметрів з наведеними на рис. 2.8, де відхилення частоти зовнішніх змін тиску відрізняється від резонансної лише на 10%.

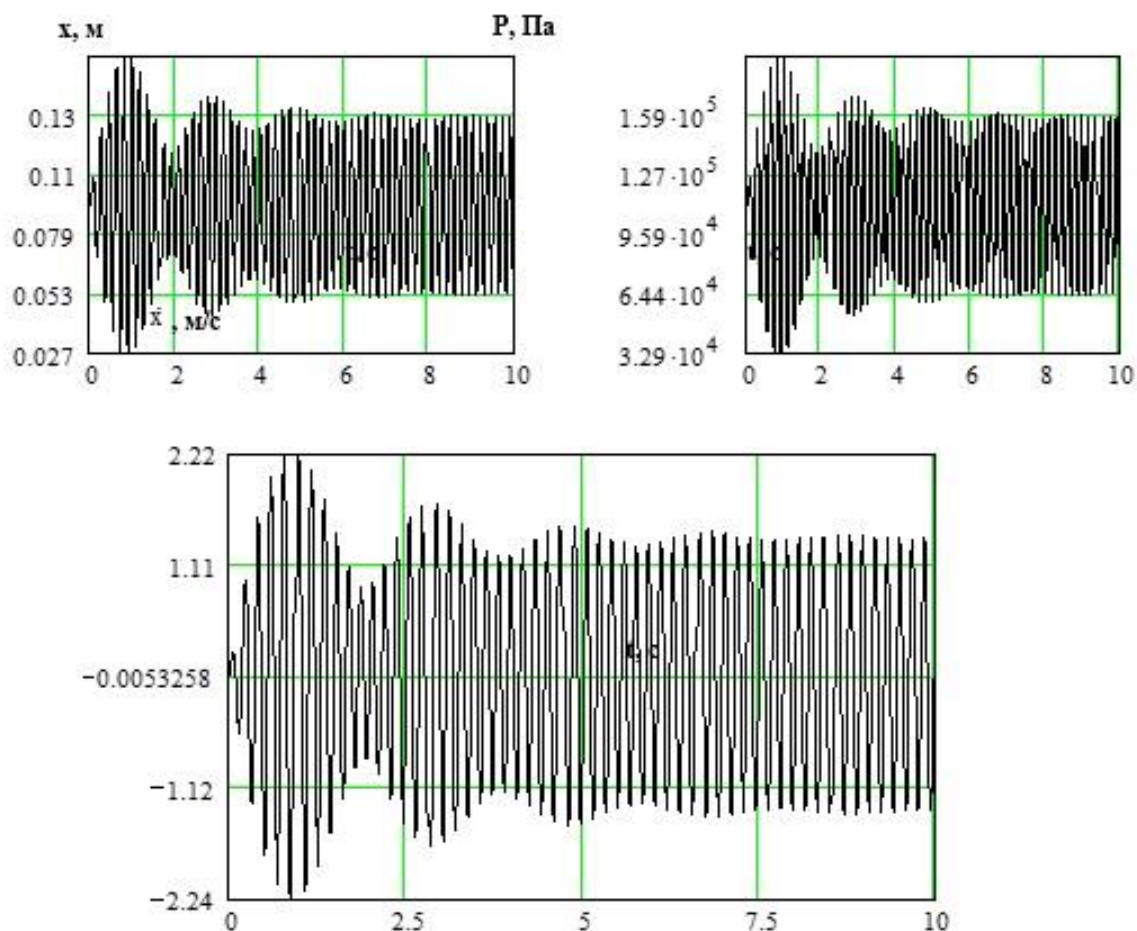


Рис. 2.8. Динаміка системи з наближенням до резонансної частоти зовнішніх впливів з врахуванням дисипативних явищ

За даними рис. 2.9 видно, що врахування дисипативних явищ не тільки стабілізує коливальні процеси з часом, а й обмежує перші екстремуми кінематичних параметрів і тисків в системі.

Впливи в зміні і наближенні частот зовнішніх збурень до резонансної відслідковуються результатами розрахунків по рис. 2.10–2.13, де кратність частот складає відповідно 0,5; 0,8; 1,1; 1,0. Рис. 2.13 відповідає умові резонансу з монотонним зростанням амплітуд параметрів. Перехід до параметрів системи не дисипативної (рис. 2.13) дає інший закон зростання амплітуд параметрів системи в коливальних процесах.

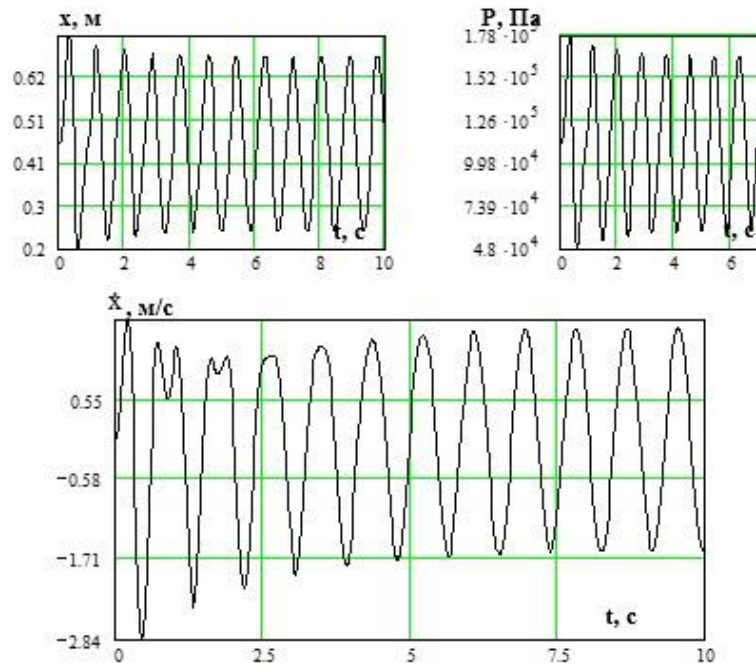


Рис. 2.9. Динаміка системи за амплітуди динамічної складової тиску $0,04 \cdot 10^6$ Па і кратності частот зовнішніх впливів і власних коливань 0,5

Аналіз одержаних результатів на рівні регресійного аналізу дозволив по першій групі дослідів одержати рівняння, якими у кодованому вигляді відображуються рівні впливів факторів:

— для деформацій

$$\bar{x} = 0,306 + 2,035 \cdot 10^{-3} z_1 + 0,156 z_2 + 0,102 z_3 + 4,65 \cdot 10^{-4} z_1 z_2 + 4,65 \cdot 10^{-4} z_1 z_3 + 5,02 \cdot 10^{-2} z_2 z_3 + 2,035 \cdot 10^{-3} z_1 z_2 z_3; \quad (2.150)$$

— для швидкостей

$$\begin{aligned} \bar{\dot{x}} = & 7,603 \cdot 10^{-2} - 5,027 \cdot 10^{-2} z_1 + 6,48 \cdot 10^{-2} z_2 + \\ & + 2,656 \cdot 10^{-2} z_3 - 4,387 \cdot 10^{-2} z_1 z_2 - 1,812 \cdot 10^{-2} z_1 z_3 + \\ & + 1,858 \cdot 10^{-2} z_2 z_3 - 1,172 \cdot 10^{-2} z_1 z_2 z_3. \end{aligned} \quad (2.151)$$

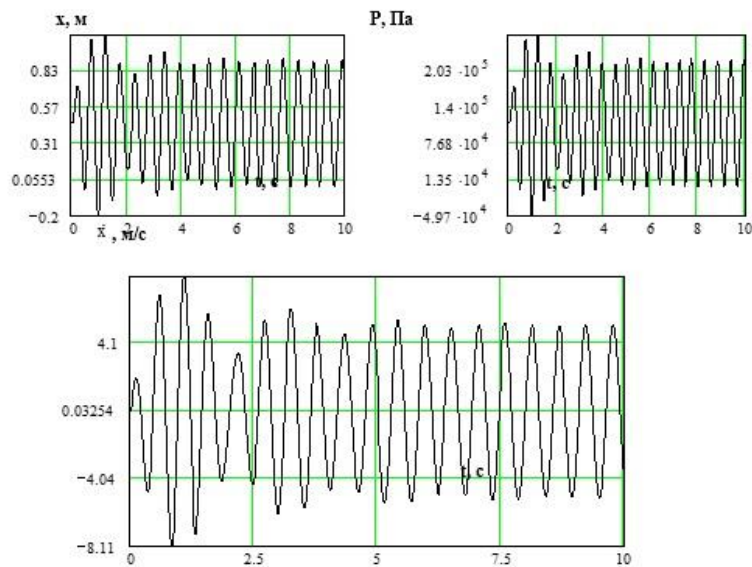


Рис. 2.10. Динаміка системи за амплітуди динамічної складової тиску $0,04 \cdot 10^6$ Па і кратності частот зовнішніх впливів і власних коливань 0,8

З умови (2.150) витікає, що фактори z_1 і z_3 виступають як параметри впливу одного порядку і такий же порядок мають їх взаємні впливи ($5,02 \cdot 10^{-2} z_2 z_3$).

У визначенні впливів на швидкість деформації середовища \dot{x} показано, що до числа впливів одного порядку додається і фактор часу перебігу процесу.

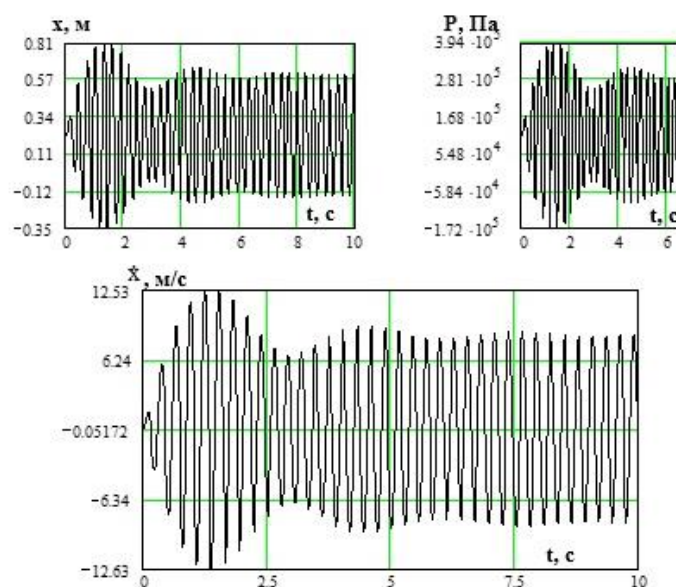


Рис. 2.11. Динаміка системи за амплітуди динамічної складової тиску $0,04 \cdot 10^6$ Па і кратності частот зовнішніх впливів і власних коливань 1,1

За даними табл. 2.5 виконано обробку результатів розрахунків за показниками екстремумів швидкостей \dot{x} і тисків P , результати яких відображено рівняннями:

$$\begin{aligned} \bar{\dot{x}} = & 8,03 + 0,386z_1 + 5,579z_2 + 0,964z_3 + 0,273z_1z_2 + \\ & + 5,887 \cdot 10^{-2}z_1z_3 + 0,64z_2z_3 + 4,725 \cdot 10^{-2}z_1z_2z_3; \end{aligned} \quad (2.152)$$

$$\begin{aligned} \bar{P} = & 2,867 \cdot 10^5 - 2,65 \cdot 10^3z_1 + 0,976 \cdot 10^5z_2 - \\ & - 8,875 \cdot 10^3z_3 - 1,225 \cdot 10^3z_1z_2 - 2,5 \cdot 10^2z_1z_3 \\ & - 6,55 \cdot 10^6z_2z_3 + 1,25 \cdot 10^2z_1z_2z_3. \end{aligned} \quad (2.153)$$

В цій групі досліджень факторами впливу було обрано частоту зовнішніх збурень з 10%-ним діапазоном наближення ліворуч та праворуч від резонансної частоти. Очевидно, що саме це в оцінці значимості факторів впливу привело до зменшення коефіцієнта при z_1 на два порядки, порівняно з коефіцієнтом при факторі впливу z_2 . Проте з коефіцієнтом при z_3 вони виступають як співрозмірні.

Третьої групи дослідів стосуються результати, наведені в табл. 2.6, по яких одержано наступні рівняння регресій:

$$\begin{aligned} \bar{\dot{x}} = & 0,22 + 2,337 \cdot 10^{-3}z_1 + 0,158z_2 + 3,705 \cdot 10^{-2}z_3 + \\ & + 1,662 \cdot 10^{-3}z_1z_2 - 4,12 \cdot 10^{-4}z_1z_3 + 2,691 \cdot 10^{-2}z_2z_3 - \\ & - 5,875 \cdot 10^{-4}z_1z_2z_3; \end{aligned} \quad (2.154)$$

$$\bar{P} = 1,38 \cdot 10^5 + 0,16z_2. \quad (2.155)$$

З останнього рівняння витікає, що до числа впливових факторів відноситься тільки амплітуда динамічної складової зовнішніх тисків, а інші слід розглядати, як незначні.

Разом з тим пульсації тисків, генерація хвиль ударного характеру тощо однозначно приводять до зміни об'ємів і форм бульбашок, що забезпечує у свою чергу посилений масообмін в середині дискретної газової фази. Таким чином через останні зміни інтенсифікуються масообмін в частині головної складової опору легкокорозинних газів. Відмічені особливості означають універсальний характер зовнішніх тисків, як універсального засобу інтенсифікації масообміну в газорідних середовищах.

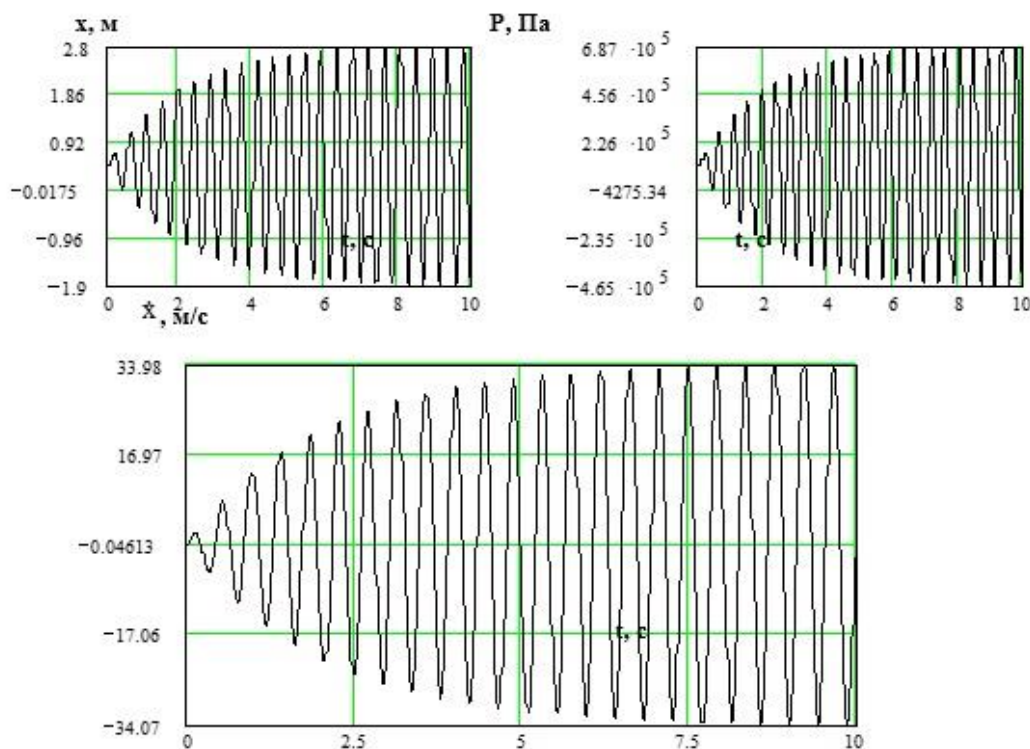


Рис. 2.12. Динаміка системи за амплітуди динамічної складової тиску $0,04 \cdot 10^6$ Па і кратності частот зовнішніх впливів і власних коливань 1,0

Виконана сукупність обчислювальних експериментів і оцінка факторів впливу приводить до висновку про те, що дія зовнішнього тиску для газорідної системи можуть виступати ефективним джерелом інтенсифікації масообмінних процесів. Останнє твердження ґрунтується на тому, що прояви зовнішніх тисків мають місце у повному об'ємі газорідних середовищ, а не в локальних зонах, при цьому такі прояви стосуються як газової, так і рідинної фаз. Хоча гіпотетичний перехід в фізичній моделі до пружного середовища ґрунтується на використанні такого поняття, як метастатичний стан, однак відносна швидкість між диспергованою газовою і рідинною фазами існує завжди і збурення рідинної

фази на рівні кінематичних параметрів і тисків означає інтенсифікацію масообміну саме в ній і у тому числі така інтенсифікація стосується рідинних плівок на поверхні поділу фаз. Останнє принципово важливо з точки зору інтересів масообміну для випадку важкорозчинних газів.

Використання тих чи інших засобів інтенсифікації з них стосується власне досягнутого результату інтенсифікації, а друга – питомих енергетичних витрат. Проте навіть і зростання останніх ще не означає необхідності відмовитися від використання обраних напрямків величиною питомих економічних витрат.

В окремих випадках оцінка доцільності і ефективності застосування методів обробки може стосуватися спеціальних критеріїв, екологічної або ергономічної оцінки тощо.

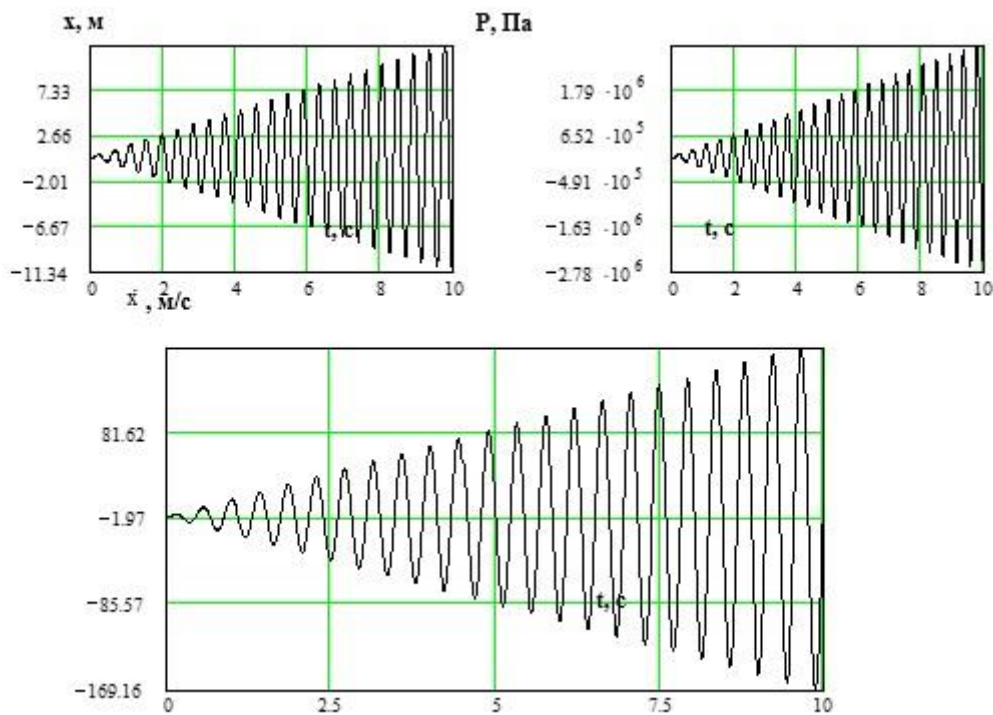


Рис. 2.13. Динаміка системи за амплітуди зовнішніх тисків

Для досліджених в цьому розділі систем енерговитрати пов'язані зі стисканням газової фази для можливості подолання гідростатичних тисків і створення зовнішніх протитисків. При цьому можливим є використання лише одного енергоджерела у вигляді валкових машин, які створюють тиски, що дорівнюють сумі гідростатичних і зовнішніх для системи.

Стискання тіста за використання відповідних засобів створюється пульсуючий характер існування газорідинної системи. Відомий об'єм газової фази в середовищі і діапазони зміни тисків дозволяють визначити рівень

додаткового енерговведення в систему. Саме вказаний об'єм газової фази має важливе значення з точки зору інтересів відтворення заданих законів зміни тисків і досягнення резонансних частот зовнішніх впливів.

Дисипативний характер взаємодії фаз, однак, виступає в ролі обмежувального явища на шляху одержання висококонцентрованих енергетичних систем. У зв'язку з цим і у відповідності з принципом суперпозиції розрахувати слід на сумарну енергію, що вводиться в систему. Проте це не означає стабілізацію питомих енергетичних витрат. Саме за досягнення резонансних частот зовнішніх впливів слід очікувати інтенсифікації масообміну і покращення показників питомих енергетичних витрат.

Висновки. З теорії коливань відомо, що жорсткість системи є однією зі складових, що визначає її власну частоту коливань та маси. Врахування тільки маси рідинної фази дозволило визначення приведених мас здійснювати на принципі еквівалентності кінетичних енергій, при цьому, використали спосіб Релея для системи сталого перерізу F , що підлягає стисканню для представлення її у вигляді зібраної маси і пружного невагомого зв'язку.

Встановлено, що частота власних коливань залежить від початкового і кінцевого тисків, приведеної маси та початкової газотримувальної здатності. Це означає, що зміна інтенсивності нагнітання тіста валками за інших рівних умов призводить до зміни частоти власних коливань системи. Очевидно, що значимість кожної аналітичної моделі і ступінь її наближення до реальних процесів залежить від застосованих гіпотез і припущень, покладених в її основу.

Розглянуто можливість виникнення коливальних процесів як по кінематичним, так і по динамічним параметрам щодо екстремумів тисків. По-перше, самі зміни тисків означають зміни гідродинамічного стану середовища, а, по-друге, важливе значення можуть мати і нижні значення тисків та можливості переходу рідинної фази у метастабільний стан.

Для встановлення загальних закономірностей і меж зміни параметрів впливів виконано попередні розрахунки у відносно широкому стохастичному наборі даних щодо законів зміни тисків $P_2=P_2(t)$, часу перебігу перехідних процесів та коефіцієнтів затухання. Крім вказаних параметрів тиску і часу перебігу процесів в якості регульованого параметру впливу на систему розглянуто газотримувальну здатність u_1 , яка за інших рівних умов визначається інтенсивністю бродіння. Інші параметри системи вважаємо стабілізованими.

Проведено постановку трифакторного обчислювального експерименту. Виконана сукупність обчислювальних експериментів і оцінка факторів впливу приводить до висновку про те, що дія зовнішнього тиску для газорідинної системи може виступати ефективним джерелом інтенсифікації масообмінних процесів. Хоча гіпотетичний перехід в фізичній моделі до пружного середовища ґрунтується на використанні такого поняття, як метастатичний стан, однак відносна швидкість між диспергованою газовою і рідинною фазами існує завжди і збурення рідинної фази на рівні кінематичних параметрів і тисків означає інтенсифікацію масообміну.

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., Piddubnuy V. Intensification of mass-exchange processes in food technologies. К. : Luxar, 2008. 443 p. URL : <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/21076/1/10.pdf>.
4. Пащенко Л. П. Биотехнологические основы производства хлебобулочных изделий. М. : Колос, 2002. 368 с.
5. Stadnyk I. Scientific and technological bases of processes and development of equipment for loosely mixing of dough: dissertation theses. Kyiv, Ukraine: National University of Food Technologies, 2013. 40 p. URL : www.elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/20799/1/Monohrafiya_Stadnyk.pdf.
6. 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.
7. Stadnyk V., Piddubnuy 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 3

ОБґРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ ПРОЕКТУВАННЯ ТА КОНСТРУЮВАННЯ ВУЗЛА НАГНІТАННЯ ФОРМУВАЛЬНОЇ МАШИНИ

3.1. Основні вимоги ефективної роботи валкових робочих органів при проектуванні

Створення нових поколінь техніки має позитивне значення для нарощування економічного потенціалу країни, збільшення валового внутрішнього продукту, що забезпечує незалежність і безпеку країни, найефективніше використання інтелектуального потенціалу населення, розвитку ринкових відносин. На жаль, вітчизняні виробники хлібопекарського устаткування пропонують продукцію, що не в повній мірі відповідає світовим тенденціям. Як правило, порівняно з імпортом, аналогічне українське устаткування є менш технологічним, більш енергоємним, менш надійним в процесі експлуатації. Аналіз діяльності хлібопекарних та кондитерських підприємств показав, що впровадження наукових організаційно-економічних розробок сприяє зниженню матеріало-, енерго-, трудомісткості виробництва продукції; випуску на цій основі дешевших якісних видів виробів; підвищенню ефективності виробництва, одержанню додаткового прибутку, необхідного для здійснення відтворювальних процесів на розширеній основі та розвитку інфраструктури підприємств; звільненню працівників від виконання важких робіт та робіт у несприятливих умовах; підвищенню зайнятості різних категорій населення і зниженню рівня безробіття.

Представлені результати аналізу науково-технічних джерел з питань проектування машин для формування тіста розкривають структуру операції дії валків, типові середовища та зв'язок структурних схем для реалізації та їх види. Завдяки детальному розгляду методів оптимізаційного синтезу та прикладів їх застосування для розв'язання конкретних задач оптимізації структури вузла нагнітання з'ясувалось, що найбільш придатними для структурної оптимізації формувальної машини для формування напівфабрикату, що налічує в собі значну кількість фізичних можливостей, є методи направлено встановлення залежностей конструктивних й технологічних параметрів процесу. Застосування методів дає можливість відсіювати частину неперспективних варіантів без

їх посереднього розгляду. Однак через відсутність відповідних універсальних засобів автоматизації даного процесу, процедура розв'язування залишається досить складною і трудомісткою для практичної реалізації. Звідси випливає, що основною проблемою на ранніх стадіях проектування машин або її модернізації для нагнітання тіста є відсутність алгоритму здійснення оптимізаційного синтезу, який би дав змогу обмежити участь людини у процесі проектування та підвищити ефективність його виконання.

Теоретичні передумови оптимізаційного синтезу машин для формування тіста передбачають, що проектування такого класу машин виступає як комплексна задача, яка включає в себе визначення необхідних параметрів для заданих умов роботи валкових робочих органів вузла нагнітання. Вибір валків формування і обґрунтування технології процесу дозволяє на їх основі використати усі можливі варіанти структури вузла й машини. Ці дані дозволяють провести пошук, серед них кращого, з використанням відповідних методів, а також побудову її 3D-моделі.

Оптимізація технологічних режимів стискання при нагнітанні тіста валками є важливим фактором, що забезпечує техніко-економічні показники процесу в цілому. При цьому, значення оптимальних технологічних режимів нагнітання, стискання і відповідних енергосилових параметрів процесу є необхідними для удосконалення наукової бази даних при проектно-конструкторських рішеннях. Ці дані також необхідні при створенні нових та при модернізації діючих машин з валковими робочими органами.

Перша важлива умова, яка забезпечує нормальну роботу нагнітаючих валків – це створення тангенціальної реакції. Дана реакція повинна перешкоджати вільному повертання 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 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.

При дії валків на тісто впливає, що діапазон механічних впливів має декілька швидкостей. Вони виникають по характеру зміни в'язкості і розподіляються на три інтервали. Перший приблизно до 20с^{-1} , характеризується зменшенням в'язкості із збільшенням швидкості зсуву (на поверхні робочого органа), другий інтервал від $20\dots 40\text{с}^{-1}$ значно меншими змінами в'язкості (другий шар, рухливий шар), в третьому – більше 40с^{-1} , невелика зміна в'язкості і вона майже постійна (робоча камера). Зміну в'язкості від стискування для бубличного тіста має лінійний характер, що описується рівнянням [22].

$$\eta = ar + b$$

де η – в'язкість, МПа с;

r – тиск, Па;

a – коефіцієнти, що залежать від швидкості зсуву.

Шар тіста обґрунтовує протікання внутрішнього тертя, приводить до зміни площі фактичного контакту і фізичного рельєфу поверхні, викликає цілий ряд явищ, що вказують на вирішальний вплив при утворенні сил тертя і ущільнення поверхневих шарів оброблювальної маси. 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 $\sigma = 2\mu\epsilon$, якщо $|\sigma| < |\nu|$, $\sigma = 2\eta\dot{\epsilon} + \nu$, якщо $|\sigma| \geq |\nu|$, де ν – характеристика зчеплення (адгезії).

У граничному випадку, коли $\mu = 0$, $\eta = 0$ або при достатньо малих їх значеннях основною властивістю даного пограничного шару буде властивість зчеплення з матеріалом робочої камери. Всередині тіста (робочий шар) буде проміжним між двома шарами (1 і 3). Третій – шар контактує із корпусом

машини. Таким чином, у нашому випадку є 3 шари тіста, причому перший шар (адгезійний) відносно робочого органа може переміщатися (прослизати) тільки тоді, коли дотичне напруження на поверхні розділу перевищує граничне напруження, тобто міцність зчеплення. Що стосується третього шару (шар до поверхні робочої камери), то він може переміщатися відносно першого в певних межах (рис. 3.1).

Кожен рівень нагнітання дає змогу вирішувати свої технологічні завдання й, у свою чергу, може ефективно реалізовуватися за допомогою валків лише відповідних типів. Останнє зумовлене тим, що кожна конструкція валка створює своє співвідношення між макро- і мікропотоками в робочій камері. Вибір типу валка залежить від технологічних вимог (рис.3.2).

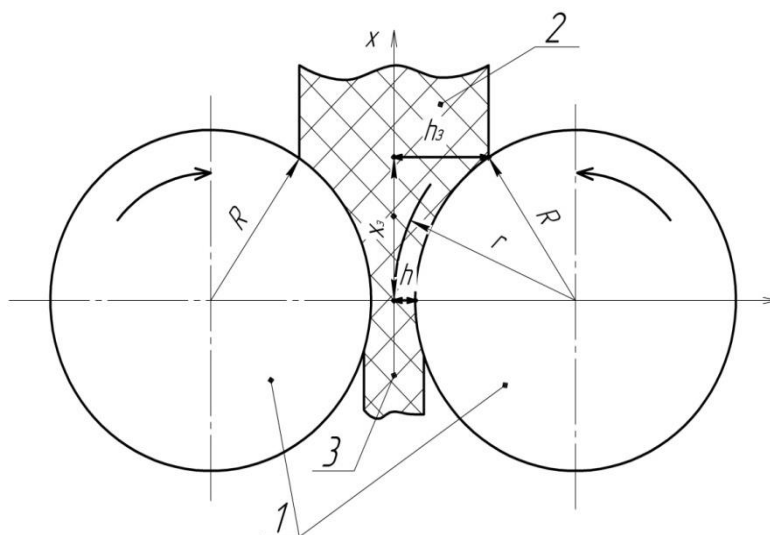


Рис. 3.1. Профіль схеми нагнітання тіста між валками:
 1 – обертові валки радіуса R , половинна відстань між якими h ;
 2 – потік тіста на вході робочої камери;
 3 – розкатане тісто після проходження валків

Наведені на рис. 3.2 дані слід розглядати, як орієнтовні й усереднені. Кінцевий вибір типу нагнітального механізму вузлів подачі виконується на основі техніко-економічних розрахунків та експериментальних даних. З рисунка випливає, що технологічне нагнітання і розкачування може бути досягнуте за допомогою обмеженої кількості нормалізованих конструкцій вузла нагнітання формувальної машини. Тому створення вузлів подачі нових конструкцій та їхніх модифікацій не завжди доцільне і має бути досить обґрунтованим. Слід також врахувати, що змінити масштабний рівень нагнітання й отримати відповідний технологічний ефект можна зміною частоти обертання,

співвідношенням розмірів валків та встановленням відповідних конфігурацій пазів на їх поверхнях.

Зазначена конфігурація робочих органів сприяє їх плавному транспортуванню по довжині профільного каналу робочої камери. Конструктивне розташування валків в робочій камері дозволяє проводити згадані процеси і дає можливість передбачити і забезпечити більшу продуктивність й інтенсивність нагнітання без зворотніх ефектів. При цьому середовище рухається не лише в коловому напрямку, а і вздовж осі поверхонь валків. В коловому напрямку вони рухаються під дією стискування робочої поверхні валка, що розвивається в об'ємі середовища в результаті його деформування. В осьовому напрямку має місце безнапірна течія.



Рис. 3.2. Вибір типу валка за технологічними вимогами

Запропонований розрахунок характеристик течії можна використовувати при проектуванні валкового нагнітача при подачі маси тіста (тістоподільні машини, формувачні машини), при дозуванні, валкових сушарок і т. д. Результати досліджень вносять вклад в гідромеханіку нелінійних середовищ. Запропонований підхід і одержані дані сприяють розвитку теоретичних основ процесу інтенсивного нагнітання, розкачування, замішування тіста.

3.2. Вплив технологічного середовища на спрацювання валкових робочих органів

Аналіз сучасного стану парку устаткування харчової галузі України свідчить про те, що його технічний рівень не можна визнати задовільним. Хлібопекарській та кондитерській промисловості притаманна своя специфіка і різноманітність технологічних процесів. Тому машинобудівна промисловість випускає для неї обладнання великої номенклатури, в ряді випадків металовмісне та кінематично складне. Характерною особливістю формувального обладнання (ФО) є наявність валкових рухомих робочих органів, що механічно впливають на середовище при безпосередньому контакті з ним. Це активно впливає на процес їх зношування. Так як середовище, в більшості випадків є агресивними і, при контактуванні їх з металами, розвивається електрохімічна корозія [1, 2].

В Україні і за кордоном ведуться інтенсивні роботи з розробки нового покоління вискоєфективного обладнання для згаданої промисловості із використанням різних конструкцій валкових робочих органів. Основною вимогою до проектування такого обладнання є забезпечення можливих конструкцій за технічними характеристиками замовника в короткий інтервал часу із малими витратами і високою надійністю. Індустріальні технології потребують розробки автоматизованих комплексів із комп'ютерним програмним управлінням, які дадуть можливість оперативно реагувати на сьогоденні вимоги до довговічності і якості спрацювання машин.

Робочі середовища даних галузей за своїм складом і природою дуже різноманітні. Їх умовно можна розділити на газоподібні, рідкі, тверді, що містять хімічні та поверхнево-активні речовини. Потрапляючи на поверхню рухомих валків, вони викликають корозійне руйнування і зношування, або комплексне корозійно-механічне спрацювання. Це визначення корозійно-механічного зношування (КМЗ) знайшло своє відображення в ГОСТ 23.002–78, де цей вид зношування трактується, як «зношування в результаті механічної взаємодії, яке супроводжується хімічною і (або) електричною взаємодією матеріалу з середовищем».

Контактування з валками викликає на їх поверхні корозію, яка спричиняє не тільки втрати металів, але також зниження механічної міцності конструкцій машин. Пошкодження від корозії призводять до зменшення точності і тривалості роботи нагнітальних механізмів формувальних, тістоподільних, тістомісильних машин. Продукти корозії забруднюють пази валків, пошкоджують зовнішній

вигляд і, потрапляючи в харчовий продукт, знижують його якість. Взаємодія робочих середовищ з поверхнею валків, що зумовлює корозійне руйнування металу, визначається рядом внутрішніх та зовнішніх чинників.

3.2.1. Аналіз системних впливів на спрацювання валкових робочих органів

В ряді робіт [3, 4] показано, що зносостійкість металів в хімічних і корозійно-активних середовищах визначається в основному їх корозійною стійкістю. Вона обумовлена характером та інтенсивністю протікаючих на поверхнях тертя хімічних (електрохімічних) процесів і швидкістю утворення продуктів корозії. В той же час, важко передбачити поведінку матеріалу при терті в агресивних середовищах. Використання раціональних матеріалів і захисних покриттів, які характеризуються високою зносостійкістю в середовищах борошняного виробництва, ускладнюються через відсутність належної кількості достовірних даних.

Внутрішні фактори визначаються природою і будовою металу валків, способом їх обробки, напруженням, які виникають при експлуатації. Зовнішні фактори пов'язані з характеристиками корозійних середовищ і умовами навантаження деталей. Вони характеризують зовнішні умови експлуатації машин, визначають якість і кількісну сторону явищ.

З аналізу даних літературних джерел та досліджень підприємств кондитерської промисловості [5, 6] випливає, що якість виконуваної роботи валками залежить від комплексу параметрів, які можна поділити на наступні категорії:

- форма, кінематика, стан і геометричні параметри валка;
- фізико-хімічні властивості середовища;
- експлуатаційні умови роботи: зазор між валками, зусилля взаємного стискання середовища, частота їх обертання;
- особливості тертя в рідких електропровідних середовищах.

Зазвичай результати зношування валкових робочих органів машин оцінюються вимірами зносу, які поділяються на характеристики службові і матеріальні [5, 6]. До службових характеристик зносу відносяться показники, що характеризують якість технологічного процесу. Найбільш вживаними матеріальними характеристиками зносу можуть бути товщина пазів і форма його поперечного перерізу, форма контуру по довжині валка та кут затягування і нагнітання тіста.

В роботах [2, 3, 7, 10] висвітлено питання впливу електрохімічних корозійних процесів на механічні властивості металів. Вказано, що цей вплив проявляється в значній мірі і при терті та зношуванні металів. Наявність хімічно-активного середовища на поверхні тертя може в декілька разів збільшити знос і навіть змінити характер цього процесу [7]. В нейтральних середовищах (вода, розчини кухонної солі) переважає киснева деполяризація за рахунок розчиненого в середовищі кисню.

За характером взаємодії з металами, робочі середовища галузі (РСГ) можна розділити на хімічно – і поверхнево-активні. В групу хімічно-активних середовищ входять водні розчини кислот, лугів, солей. Їх особливістю є те, що молекули розчинених в них речовин можуть дисоціювати і, тим самим, обумовлюють можливість протікання електрохімічних корозійних процесів.

Необхідно відмітити, що (ВЛР) валкові робочі органи експлуатуються в умовах підвищеної вологості. Пари води, адсорбуючись на поверхні валків, а також розчинені гази (CO_2), створюють умови для протікання електрохімічних реакцій. Робочі середовища хлібопекарської та кондитерської промисловості в більшості випадків є електрохімічними суспензіями. Тому процес корозійно-механічного зношування валкових робочих органів в більшості випадків протікає в умовах електрохімічного впливу середовищ.

Значна кількість речовин в середовищі, зміна їх концентрацій, взаємодії між ними і мікроорганізмами, присутність стимуляторів, тощо, призводять до відносної нестабільності системи. За таких умов необхідно передбачити, в якому напрямку слід оцінювати впливи окремих факторів. Проте, негативні наслідки також слід програмувати, наприклад, за величинами осмотичних тисків, подвійних і потрійних впливів факторів, погіршення якісних показників продукції тощо. Якщо вплив температури ретельно можна відслідкувати, то відносно тиску завершеної точки зору не існує [6, 7, 8]. Проте закони термодинаміки дозволяють визначити параметри тиску і температури. Особливо з газових законів, рівнянь Менделєєва-Клайперона, закону Генрі тощо.

Обертові валки формувальних машин, які працюють в технологічних середовищах (тісто) з постійним впливом адгезії і сил тертя, можна розглядати, як металеві електроди, заглиблені в електроліт. Вони електрично заряджаються відносно розчину, що призводить до виникнення різниці потенціалів. Особливості тертя металів в рідких електропровідних харчових середовищах полягає в тому, що цей процес залежить від електродних потенціалів ϕ їх поверхонь. Його вимір базується по відношенню до деякого електроду порівняльно-фундаментальної характеристики електрохімічних систем [7, 8].

Такий підхід встановив виникнення нового напрямку, що народився на межі трибології і електрохімії та є розділом фізико-хімічної механіки матеріалів. Взаємодія зовнішніх середовищ з поверхнею металу розглядається зазвичай з точки зору утворення граничних плівок, адсорбційного зниження міцності і пластифікування металу, який деформується, хімічного модифікування поверхневих шарів.

Утворення на поверхнях металів плівок-продуктів взаємодії з середовищем призводить до зміни їх потенціалів, що впливає на механічні властивості і, відповідно, на інтенсивність зношування. Природа плівок обумовлена хімічними властивостями середовища, його складом, наявністю розчиненого кисню та інших газів. Крім того, плівки можуть виконувати роль мастила і зумовити зменшення коефіцієнту тертя. Інтенсивність корозійних процесів визначається щільністю, адгезійною здатністю плівок по відношенню до основного металу, їх зносостійкістю [2, 6].

Оскільки в'язке тертя завжди супроводжується додатковим перемішуванням рідин з їх нагріванням, а такі впливи, як дія валків на тісто, не досить досліджено. Тому для правильного вибору матеріалів та встановлення зношування поверхні, працюючих в умовах корозійно-механічного зношування, а також для вивчення природи цього процесу велике значення має визначення дійсної швидкості зношування при терті.

Проблема ускладнюється не тільки динамікою поступового розвитку процесів зношування та руйнування поверхонь фрикційного контакту у часі на мікрорівні, широким експлуатаційним діапазоном температур та навантажень, але й специфікою будови тіста, що обумовлює їх руйнування.

Тертя в середовищі обертових валків представляє собою імпульсний коливальний процес, внаслідок чого можуть коливатись значення ϕ . Коливальні процеси роблять суттєвий вплив на процеси адсорбції [8]. Найбільш перспективним є електрохімічний метод дослідження поверхонь тертя. Застосування і подальший розвиток цього методу дозволяє глибше вивчити механізм і закономірності корозійно-механічного зношування металів і сплавів в технологічних середовищах галузі. Дослідження засобів зменшення зносу валків при терті в агресивних середовищах галузі – проводиться в двох напрямках: використання матеріалів, які можуть протистояти корозії і зношуванню в різних експлуатаційних умовах; використання електрохімічного захисту для зменшення КМЗ деталей, виготовлених з недефіцитних металів і сплавів.

3.2.2. Визначення корозійно-механічного зношування валків

При корозійно-механічному зношуванні агресивне середовище може інтенсифікувати процес руйнування поверхонь тертя металів внаслідок зниження їх поверхневої енергії, обумовленої фізичною і хімічною адсорбцією різноманітних хімічних і поверхнево-активних речовин, які знаходяться в середовищі, тобто внаслідок реалізації ефекту Ребіндера [7].

Незалежно від величини рН корозійно-активні середовища (КАС) галузі сприяють локалізації деформації в більш тонких поверхневих шарах деталей у порівнянні з тертям. Підвищення рН активних середовищ сприяє збільшенню відносної деформації робочих поверхонь робочих органів, вузлів формувальних машин та зменшенню глибини деформаційної зони. В слабкислому середовищі висока локальна концентрація дислокацій призводить до крихкого руйнування поверхонь тертя.

Хоча більшість дослідників вважають, що ведучим при КМЗ є корозійний вплив середовища, природа і характер цього процесу вивчені ще не повністю і до теперішнього часу немає єдиної точки зору про співвідношення корозійного і механічного чинників при руйнуванні деталей. Від оцінки рівня взаємовпливу цих чинників залежить вибір зносостійких матеріалів і методів боротьби з КМЗ деталей обладнання.

Механізм корозійно-механічного зношування матеріалів в агресивних середовищах-електролітах харчової промисловості може бути описаний на основі аналізу термодинамічних систем. Вони дають можливість зв'язати макроскопічні параметри валків з електрохімічними характеристиками взаємодії і руйнування в технологічному середовищі.

При розгляді сталого процесу корозійно-механічного зношування валків в агресивних середовищах, термодинамічну систему можна розглядати, як взаємозв'язок виникаючих температур при виконанні роботи. Цю систему можна поділити на дві частини. В першій протікають тільки деформаційні процеси, а в другій, крім цього, проходять хімічні реакції із зміною площі вільних поверхонь. Сумісний кількісний аналіз нагнітання середовища валками можна визначити при використанні універсальних енергетичних критеріїв з використанням методів термодинаміки необоротних процесів. Такі процеси описуються за допомогою дисипативної функції [10, 15].

$$\bar{\psi} = T \frac{diS}{dt} - \sum \frac{d\bar{W}_{\text{duc}}}{dt} + I_c A_c$$

де $\psi = \psi / S_k$ – дисипативна функція (швидкість розсіювання енергії в системі) віднесена до одиниці поверхні контакту S_k ;

T – температура системи;

$di\bar{S}/dt = diS/S_k dt$ – зміна ентропії системи;

$d\bar{W}_{\text{duc}} = dt$ – швидкість розсіювання енергії для і-процесу, який реалізується в системі;

$\bar{I}_c A_c = \frac{I_c}{S_k} A_c$ – потужність хімічної реакції;

\bar{I}_c – швидкість хімічної реакції;

A_c – хімічна спорідненість реакції.

Швидкість розсіювання енергії пов'язана з пластичним деформуванням і утворенням нових поверхонь, що складає:

$$\sum \frac{dW}{dt} - \frac{d\bar{W}}{dt} + \sum \frac{d\bar{W}_s}{dt}$$

Дисипативна функція процесу пластифікації має вид [10]:

$$\bar{\psi}_{\text{пл}} = \frac{dW_{\text{пл}}}{dt} = \bar{I}_d A_a$$

де $\bar{I}_d = I_d / S_k$ – густина потоку дислокацій;

$A_a = \Delta\tau / \alpha$ – хімічна спорідненість процесу утворення і переміщення дислокацій;

$\Delta\tau$ – знеміцнення матеріалу;

α – кількість дислокацій в одиниці деформованого матеріалу.

Процес зношування поверхні валка, дисипативну потужність процесу можна виразити таким чином [10]:

$$\sum \frac{d\bar{W}_s}{dt} = I_{S_0} \Delta\sigma_0 + \bar{I}_{Sm} \Delta\sigma_m$$

де $I_{S_0} = dS_0/S_k dt$ і $I_{Sm} = dS_{Sm}/S_k dt$ – швидкості зміни площі вільної поверхні оксидів і не окисленого матеріалу;

$\sigma_0 i \sigma_m$ – відповідно робота утворення одиниці нової вільної поверхні оксидів і вихідного матеріалу.

З урахуванням вище наведених виразів, можна записати:

$$\bar{\psi} = I_\alpha \frac{\Delta\tau}{\alpha} + \bar{I}_{S_0} \Delta\sigma_0 + I_{Sm} \Delta m + \bar{I}_c A_c$$

Вся зовнішня робота, виконана над системою тертя, буде:

$$W = P f_{mp} L$$

де P – питоме навантаження;

f_{mp} – коефіцієнт тертя ковзання;

L – шлях тертя.

Відповідно, розсіяння енергії буде мати вигляд:

$$\psi = KP f_{mp} V$$

де K – постійна, яка характеризує долю розсіяної енергії при зношенні;

V – швидкість відносного ковзання частинок середовища по поверхні тертя.

Із даного рівняння видно, що швидкість корозійно-механічного зношування лінійно залежить від навантаження і швидкості ковзання та параболічно від знеміцнення матеріалу корозійно-активним середовищем.

Результати аналітичних і експериментальних досліджень підтверджують адекватність даного методу. Вони також свідчать, що технологічне середовище може в десятки разів змінювати інтенсивність зношування матеріалів [10]. Для нашого випадку корозійно-механічне зношування поверхонь валків не може розглядатися даними залежностями. Це більш складний процес, в якому електрохімічне розчинення служить каталізатором вторинного руйнування.

Тертя, в даному випадку, спричиняє розвиток електрохімічної корозії. В усіх цих процесах відіграє потенціал системи, який досить не просто визначити при дискретній дії валків на середовище.

Тому, необхідність забезпечення гарантованої надійності валкових машин, запобігання їх відмов, зменшення втрат від пошкодження та руйнування виробів, в цілому, потребує вдосконалення та розробки методів контролю та діагностики стану поверхонь фрикційного контакту з підвищенням їх достовірності.

При дослідженні процесів тертя та зношування поверхонь валків використанням методів термодинаміки необоротних процесів, як правило, використовують традиційні методи вимірювань та контролю. До таких методів відносять вимірювання та контроль температури в безпосередній близькості від зони тертя, а також вимірювання та контроль сили або моменту тертя поверхонь фрикційного контакту. Однак висока інерційність традиційних методів контролю та діагностики стану, їх низька чутливість до процесів тертя та зношування на мікрорівні, реакція на необоротні процеси, які виникають на стадіях катастрофічного руйнування поверхонь, складність інтерпретації отриманої інформації про зміни стану поверхонь фрикційного контакту призводить до низької достовірності існуючих методів контролю та діагностики. Тому при дослідженні процесів тертя та зношування поверхонь фрикційного контакту валків із тістом використовуються нетрадиційні методи, що володіють високою чутливістю до процесів, які виникають при терті поверхонь на мікрорівні.

На основі існуючих термодинамічних теплових процесів при їх розрахунках, до вимірювань температури ставляться такі технічні вимоги:

- можливість вимірювань в потрібних точках під час різних теплових режимів роботи;
- внесення мінімальних порушень у теплове коло під час вимірювань;
- можливість виконання дистанційних вимірювань, переважно методами безпосереднього оцінювання;
- незалежність результатів вимірювань від вібрації, електромагнітних полів та умов навколишнього середовища;
- висока точність вимірювань;
- можливість використання для вимірювань температури простої та стандартної апаратури.

Відповідно до вказаних вимог в подальшому (розділ 6) розглянемо запропонований метод температурних режимів та способи вимірювання температури. Даний метод набуває все більшого застосування при дослідженні та контролі.

3.3. Напрямки забезпечення довговічності і надійності машини при проектуванні

Ефективне виконання технологічних операцій в умовах автоматизованого виробництва є важливим критерієм, що дозволяє досягнути високу точність, зменшити матеріалоємність, підвищити продуктивність. Характерною ознакою сучасного технологічного процесу є висока концентрація технологічних операцій, що супроводжується маніпулюванням і позиціонуванням технологічних середовищ. Крім того, в цілому ряді технологічних процесів формування, до робочих органів висуваються умови щодо якісного затягування (захоплення) і нагнітання середовища. Методика проектування таких робочих органів повинна врахувати їх конструктивні особливості та вимоги технологічного процесу. Перспективним є застосування високопродуктивних і надійних поверхонь валків, що дозволять якісно впливати на процес і середовище.

У цей же час розвиток фізико-математичних основ теорії течії середовища, виявлення й вивчення їх ефектів дозволяє не тільки правильно прогнозувати при проектуванні, але й відкриває можливості для створення машин, що працюють за нагнітальним принципом. Тому перспективним напрямком розвитку сучасних технологічних процесів у харчовій промисловості по забезпеченню збільшення випуску харчових продуктів з одночасним підвищенням їхньої якості, є розробка технологій із застосуванням машин з м'якими, деформуєчими, гнучкими робочими органами.

Для вдосконалення конструкції валкових машин були вивчені процеси, які відбуваються в робочих камерах. При аналізі існуючих наукових розробках машин з валковими робочими органами вітчизняного й іноземного виробництва особлива увага приділена конструкціям, що забезпечують якісний режим роботи, оскільки саме він забезпечує помірну пульсацію тиску подачі маси середовища без застосування додаткових компенсаторів.

Розглянуті різні конструктивні особливості валків по забезпеченню нагнітання, транспортування, розкочування та змішування встановили, що режими роботи і різні фізико-механічні властивості рецептурних компонентів на стадіях їх початкової дії і дальшого стискання середовища вимагає

застосування різних валкових робочих органів та критеріїв оцінки процесу на цих стадіях. Об'єктивну інформацію дають прямі реологічні методи, що добре координуються з технологічними властивостями середовища. Порівняння основних видів деформації при нагнітанні (стиснення, розтягування, зсув) показує, що найбільшу інформативність має деформація розтягування. Вона найбільш чутлива до зміни структурно-механічних властивостей середовища і сил міжмолекулярної взаємодії [1].

Загальним недоліком подібних робіт є відсутність у них достатніх теоретичних уявлень і висновків, що забезпечують можливість обґрунтованого підходу до проектування формувальних машин з валковими робочими органами та різними конструктивними і технологічними параметрами. Будь-яка теоретична обґрунтованість нагнітання, розкачування для підтвердження своєї об'єктивності не може обійтися без практичної перевірки. Тому математична модель роботи формувальних машин основана на приблизному розв'язку рівняння руху в'язкої рідини в камері машини між валками. Це дозволяє обґрунтувати основні показники машини – продуктивність, потужність, конструктивні параметри робочої камери і робочих органів.

Проблема створення єдиного методологічного підходу до розробки технології валкового нагнітання тіста та апаратурної реалізації під час проектування, з використанням сучасних методів математичного моделювання є теоретичним та методологічним підґрунтям наукової концепції досліджень [1]. У формувальній машині валковий робочий орган має просту геометрію, тому можливий аналітичний розрахунок, оскільки відома гідродинаміка руху і термін перебування тіста у перетинах робочої камери [2, 3].

В процесах пластичної формозміни середовища валками виникають деформації та неоднорідні поля напружень. Неоднорідний напружено-деформований стан середовища супроводжується виникненням залишкових напружень, які суттєво впливають на якість процесу. Залежність інтенсивності напружень від інтенсивності деформацій створює площадку плинності, що суттєво впливає на розподіл залишкових напружень.

Вибір напрямків створення валкових машин, які повинні відповідати умовам роботи харчової та переробної галузей, залежить від сукупності типів параметрів і факторів, які характеризують технічні рішення, що закладаються в конструкцію машини. На показники роботи валкових машин впливають не всі конструктивні елементи, а лише ті фактори, що призводять до зміни якісних показників, технологічних чи кінематичних. Діючі фактори пов'язані з двома

основними вузлами машини: нагнітальний вузол (валковий робочий орган та робоча камера) та формувальний вузол.

При створенні конструкції даного класу машини необхідно мати насичену базу даних про можливості виконання того чи іншого вузла машини, складність виконання технічних рішень, можливість обслуговування та проведення ремонту, а також шляхом співставлення енергетичних затрат, показників якості продукції та показників надійності, можна було би прийняти раціональну сукупність технічних рішень та закласти їх в розроблювану конструкцію. Необхідно врахувати вимоги, котрі ставить промисловість перед сучасним технологічним обладнанням: забезпечити раціональні параметри процесу в робочій камері машини в цілому, загальне конструктивне рішення вузлів і всієї машини.

Технічний рівень та показники якості вітчизняної формувальної, роздільної техніки та тенденції їх зміни свідчать про надто повільний ріст вказаних параметрів. Для забезпечення проектування конструктивно-технологічних параметрів та випуску конкурентоспроможного обладнання необхідно підвищити їх якість за рахунок побудови конструкцій за модульним принципом з використанням уніфікованої елементної бази, застосування прогресивних інтенсифікуючих методів та засобів [1, 2]. З іншого боку для підвищення рівня конкурентоспроможності вітчизняного обладнання необхідно створити і розвивати науково-дослідні центри з сучасною випробувальною базою для відпрацювання конструкцій робочих органів і робочих камер та процесів. Необхідно переглянути нормативно-технічну документацію зі створення та виготовлення тістомісильних машин, оновити методології проходження процесу замішування та випробувань з метою отримання якісних показників готової продукції [6, 14].

Одночасно, з вище згаданими рішеннями, необхідно підвищити надійність конструкцій, так як це одна з найважливіших задач теорії і практики машинобудування. Концепція забезпечення надійності машин ґрунтується на тому, щоб на стадії проектування створити конструкцію з заданим терміном експлуатації і мінімальними затратами споживача на придбання, обслуговування та ремонт. Стандартна методика оцінки надійності валкових машини має певні особливості, спричинені місцевими умовами експлуатації через використання погіршеної якості сировини, змінними умовами проходження процесу підготовки напівфабрикатів, кваліфікацією обслуговуючого персоналу.

Реалізація концепції забезпечення надійності і якості технологічного процесу формування, розкачування, ділення, замішування передбачає вирішення

ряду стандартних задач: встановлення економічно-оптимального терміну служби машини до списання (і одночасно терміну служби невідновних конструктивних елементів і систем); проведення розрахунку очікуваних ресурсів (технологічної очистки деталей, вузлів, агрегатів і машини в цілому), і на цій основі – визначення лімітуючих елементів машини [1, 17]. Подальший розв’язок задач пов’язаний з проведенням аналізу, стендових і експлуатаційних випробувань дослідних зразків обладнання для перевірки результатів прогнозованого розрахунку. На основі їх виконання провести доопрацювання по уточненню розрахунків надійності елементів (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Структурна схема алгоритму забезпечення технічного ресурсу машини з валковими робочими органами

При проектуванні технологічної оснастки повна визначеність та достовірність має місце під час аналізу об’єкту оснащення. Зрозуміло, що такий перехід можна виконувати вручну. Але при реальних кількостях конструкцій машин, що підлягають обробці, використання комп’ютерних технологій при виконанні такої операції не тільки доцільне, але й необхідне. Тому, для спрощення процесу розрахунку та отримання основних відхилень з

відображенням реальних кількісних показників з можливістю скорегувати результати, широко використовується моделювання.

Інформаційне моделювання є необхідною передумовою використання комп'ютерних технологій при проектуванні технологічної оснастки. Інформаційна модель є тим середовищем, в якому виконуються проектні процедури – елементарні процеси перетворення інформації. Найбільш складними з них є процеси синтезу конструкції технологічної оснастки. Для простих різновидів оснастки, наприклад інструментів, фаза синтезу зводиться до знаходження типової параметричної моделі. В цьому випадку задача синтезу стає різновидом задачі діагностики і може бути сформульована так: за вихідними даними технологічної функції та її умов знайти клас оснастки, що забезпечує виконання цієї функції з урахуванням визначених умов. Таким чином, задача може бути розв'язана, якщо існує відносність між завданням на проектування (завдання на проектування = технологічна функція + технологічні умови) та схемою екземплярів певного класу технологічної оснастки.

Методи розрахунку довговічності елементів металоконструкцій машин з валковими робочими органами, як правило, полягають у статистичному або критеріальному підході до оцінки міцності і дають неоднозначні результати прогнозованого терміну роботи машини. При проектуванні нових необхідно проводити оцінку різних альтернативних впливових значень.

Проблема конструювання і виготовлення валкових машин, особливо мобільних, на сучасному рівні пов'язана з оптимізацією їх елементів за матеріаломісткістю, геометрією побудови основних принципівих схем та прогнозування ресурсу роботи. Загальновідомо, що сьогодні в світовій практиці домінує принцип забезпечення обмеженого ресурсу складових оснастки машини з встановленою імовірністю не руйнування. Тому постійно підвищуються вимоги до точності оцінки їх ресурсу.

Модернізацію існуючих машин, з точки зору оптимізації їхніх металоконструкцій за довговічністю, ефективно досягається шляхом вирішення аналітично-пошуковим та експериментально-дослідним характером:

- точне моделювання динамічної завантаженості і отримання на цій основі вірогідних числових значень шуканих параметрів;
- визначення реальної динаміки завантаженості робочої камери шляхом проведення ґрунтовних експериментальних досліджень в натуральних умовах експлуатації машини на найбільш характерних параметрах: тривалості процесу, частоти обертання робочого органу, витрати потужності, створення вібраційного поля, тривалості релаксації і текучості тіста, стадійності нагнітання і т.д;

- вироблення критеріїв міцності і надійності з позиції дискретності (циклічності) дії процесів у робочій камері машини;
- формування і схематизація оптимізованих конструкцій робочих камер з прогнозованим ресурсом в цілому.

Об'єктивний аналіз закономірностей деформації та поданих рекомендацій, дозволяє оцінити переваги і недоліки інтенсифікації процесу і визначити перспективність дальших досліджень у цьому напрямку. Основними напрямками по забезпеченню вимог ефективної роботи валкових робочих органів необхідно спрямувати на зменшення пульсації подачі й поліпшення затягування тіста. Відповідно передбачити зниження рівня незворотних втрат, зменшення металоємності, поліпшення ремонтпридатності та надійності конструкції. З цих позицій було розроблено схему їх удосконалення (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Схема удосконалення механічних впливів валками на середовище

Згідно запропонованим напрямкам удосконалення механічних впливів валками на середовище передбачено основні три складові при їх проектуванні: удосконалення параметрів впливу; обґрунтованість перспективних впливів; цільова направленість на формування умов дії валків різної конструкції. Таким чином, удосконалення конструктивних особливостей валкових машин спрямоване на забезпечення інтенсифікації процесу і їх 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.

Проведений аналіз дозволив провести цілий комплекс робіт, спрямованих на удосконалення процесу дії валків на середовище. Зважаючи на фізичну суть розвитку формувального обладнання та загальних задач, які необхідно розв'язати при проектуванні, спрямованих на простоту конструкції, надійності, взаємозамінності, нами запропоновано цілий ряд нових конструкцій валків, що дозволяє провести наближену оцінку енергоефективності їх дії на середовище.

При створенні валкових машин особливу увагу необхідно зосередити на обґрунтуванні технологічної схеми та відповідному конструктивному розв'язанні прийнятих рішень, оскільки це суттєво впливає на можливість виготовлення такої машини в умовах підприємств, технологічні можливості яких орієнтовані на ремонт та відновлення техніки. Це в свою чергу дозволить розв'язати проблему забезпечення власників міні – виробництв формувальною технікою, незважаючи на кризові явища, що охопили основні машинобудівні заводи, та економіку в цілому.

Випробування машин, їх вузлів і деталей – потужний засіб технічного процесу в машинобудуванні. Випробування поділяють на короткочасні, при яких фіксується стан об'єкта у даний момент і довготривалі, при яких контролюється зміна стану за часом. Таке рішення спрямовано на забезпечення необхідної надійності устаткування, що створює можливість достатньо швидкої оцінки. Прискорені випробування досягаються забезпеченням неперервності випробувань, які ґрунтуються на підвищенні частоти обертання та навантаженні робочих органів, впливу середовища з точним виміром параметрів, використанням наукового планування експерименту.

Для виявлення причин відмов, руйнувань конструкцій та неякісного формування на валкових машинах розглядають їх експлуатаційну завантаженість, що характеризується сукупністю статистичних показників процесів. Виходячи з фізико – механічних та біологічних особливостей тіста до якості роботи формувальної машини пред'являються жорсткіші вимоги, порівняно із загальновиробничими машинами. Зокрема, машина повинна бути надійною і зручною в експлуатації та забезпечувати необхідний у кожному конкретному випадку процес; вона повинна швидко і повністю очищатися при переході від одного сорту до іншого; робочі органи не повинні травмувати тісто; застосування пазів на валках повинно сприяти значному підвищенню продуктивності і якості.

Тому фактори, що впливають на довговічність та ефективність роботи розділяють на дві групи: зношування і динамічні навантаження. Зношування можна виділити корозійно – механічне. Цей фактор спричиняє поступовий прогнозований знос тягових елементів та незначний знос валкового робочого органа. Динамічні навантаження поділяють на незначні циклічного характеру і змінні, знакозмінні, періодичні. Незначні навантаження робочого органа виникають внаслідок умов навантаження під час робочого режиму нагнітання тіста. Значні динамічні навантаження можуть бути викликані особливостями роботи, умовами руху маси тіста. Це спричиняє швидке спрацювання несучих та робочих частин, елементів приводу, а також прискорений знос елементів конструкцій.

У вихідних даних при проектуванні нового робочого органа чисельні характеристики повинні враховуватися вимогами експлуатації і виробництва за рівнем автоматизації. Таким чином, є два види робочих органів, відомий та удосконалений, які варто оцінити за допомогою заданого або прийнятого народногосподарського критерію і на цій підставі розробити оптимальний варіант принципово нового робочого органа, що підлягає реалізації.

Для вирішення задач компоновання нового робочого органу формувальних машин необхідно залучити алгебру логіки і теорію множини, властивості середовища, що дозволяють розглянути компоновання як упорядковану множину робочих ланок, а різноманітні їх сполучення – як логічні відношення елементів цієї множини. У загальному випадку ці задачі є багатоекстремальними і тому потребують глобального екстремуму. При виборі кращого варіанту проектування вибрано метод розставлення пріоритету – якісної оцінки варіантів. На основі багатокритеріального якісного аналізу експертизи варіантів розроблено ряд валкових робочих органів.

3.3.1. Забезпечення надійності при розробці, виготовленні та експлуатації машин

Істотними у визначенні надійності є вживання прогресивних структурних схем компоновки вузлів, зчленування деталей, вдалих і правильний підбір матеріалів, комплектація приводу електродвигуном з відповідною характеристикою, розробка надійної системи захисту рухомих елементів від попадання борошна, тіста і ін., а також забезпечення надійної системи змащування деталей, очищення робочої камери і робочих органів машини від оброблюваного продукту (борошна, закваски, тіста, опари і ін.).

В процесі розробки технічного завдання на машину необхідно визначити технічно обґрунтовані і економічно доцільні показники безвідмовності і довговічності машини.

Під час експлуатації машини виникають раптові і поступові відмови.

Нехай $P_1(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи машини при раптових відмовах, а $P_2(t)$ – при поступових відмовах, c_1 і c_2 – частоти раптових і поступових відмов. Вірогідність безвідмовної роботи машини за наявності обох видів відмов.

$$P(t) = c_1 P_1(t) + c_2 P_2(t). \quad (3.1)$$

Якщо машина має структурну схему з n з'єднань функціональних вузлів, то ймовірність безвідмовної роботи машини при послідовному з'єднанні функціональних вузлів

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t). \quad (3.2)$$

а при паралельному з'єднанні функціональних вузлів

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(t)] \quad (3.3)$$

де $\prod_{i=1}^n$ – добуток наступних ймовірностей безвідмовної роботи від 1 до n функціональних вузлів.

Під *функціональним вузлом* слід розуміти функціональну групу деталей, об'єднану конструктивно, яка визначає окрему технологічну функцію машини, наприклад, в формувальній машині нагнітач тіста, стабілізатор тиску, формувальний пристрій і ін. Функціональний вузол може містити декілька вузлів (складальних одиниць), що групуються за принципом виготовлення, як виріб, складові частини якого підлягають з'єднанню між собою на заводі виробнику складальними операціями (згвинчуванням, зваркою, клепою, опресовуванням, розвальцьовуванням та ін.).

Для різних випадків роботи і систем машини щільність розподілу відмов може бути досить точно описана відомими законами нормального розподілу Гауса, Вейбулла, експоненціального та ін. При розподілі Вейбулла щільність розподілу описується виразом

$$f(t) = b/a \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} \exp[-(t/a)^b] \quad (3.4)$$

де b, a — параметри розподілу.

Ймовірність безвідмовної роботи

$$P(t) = \int_t^{\infty} b/a(\tau/a)^{b-1} \cdot \exp[-(\tau/a)^b] d\tau \cdot \exp[-(t/a)^b] \quad (3.5)$$

Середнє напрацювання машини до відмови

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} \tau f_{cp}(\tau) d\tau \quad (3.6)$$

де f_{cp} — щільність розподілу до відмови.

Середнє напрацювання до відмови можна приблизно визначити

$$T_{cp} \approx 1/n \sum_1^n T_i \quad (3.7)$$

де T_i — час напрацювання до відмови i -ї машини в партії з n машин.

Чим складніша конструкція машини, тим більш високу надійність вона повинна мати. Наявні при виготовленні складних машин неточності виготовлення і збирання значно впливають на зниження надійності.

На надійність машини істотний вплив роблять також технологія виготовлення і дотримання вимог технічної документації на виготовлення, збирання, регулювання і обкатка (прокрутка) машини. Використання термічної обробки і спеціальних операції по доведенню до номінальних значень точності розмірів деталей, що дотикаються і труться, забезпечення високої чистоти обробленої поверхні з використанням діамантового інструменту і спеціальних абразивних паст, дозволяє у декілька разів підвищити надійність роботи виробів. Позитивний вплив здійснює також вживання спеціальних покриттів у вигляді хромування, сульфидування.

Наступною важливою ланкою є збирання, регулювання і обкатка машин. Збирання повинне забезпечити правильну посадку сполучних елементів, легке

обертання валів у вузлах тертя без заїдань і люфтів, надійне сальникове ущільнення підшипникових вузлів, що забезпечує запобігання витіканню змазки і попадання пилу та тіста у вузли тертя.

При прокрутці і прийманні машини необхідно по можливості прогріти вузли тертя машини і впевнитись у:

- відсутності протікання змазки і інших рідин, які використовуються на машині;
- підвищеного нагріву вузлів тертя;
- люфтів, стуків і потріскувань,
- забезпеченні оптимальних параметрів у робочій камері машини.

Тобто, необхідно впевнитись в тому, що машина не має дефектів і всі її вузли функціонують нормально.

На забезпечення надійності при виготовленні впливають правильна консервація, закріплення рухомих частин, упакування, захист машини від вологи і пилу при її транспортуванні, комплектація її необхідною технічною документацією, комплектом запасних швидкозношуваних деталей і спеціальними інструментами та пристосуваннями для розбирання і змащування, якщо в них є необхідність.

Порушення хоча б одної з перерахованих умов може спричинити значне скорочення терміну служби машини і виникнення аварійних ситуацій.

Надійність, закладена в машині при проектуванні і виготовленні, може бути повністю реалізована лише в разі дотримання всіх технічних вимог до розконсервування, монтажу, змащування, налагоджування і випробування у виробничих умовах на холостому ході і вже після цього під навантаженням.

3.4. Методика розрахунку оптимальних параметрів валкового розкачування

Конструктивні параметри валків спрямовані для забезпечення потоків тіста при його вирівнюванні і перерозподіленні в об'ємі його маси за рахунок плавного затягування, транспотування і нагнітання в зазорі між ними. Хоча процес нагнітання середовища (тіста) за допомогою валків на перший погляд уявляється простим, але побудова його математичної моделі і пошук основних розрахунків залежностей досить складний. Зараз є ряд розрахунків, котрі базуються на спрощенні дійсного процесу і не враховують впливу еластично-в'язкої і пластичної структури тіста і дії на неї коливань тиску.

В загальному випадку продуктивність вузла нагнітання (кг/с), що має валкові робочі органи різного діаметру, які обертаються з різною швидкістю, може бути визначена з формулою [3]:

$$P = \pi l \delta \rho (R_1 n_1 K_1 + R_2 n_2 K_2)$$

Для випадку однакових діаметрів валкових робочих органів, котрі обертаються з однаковою швидкістю, продуктивність розраховують так:

$$P = 2\pi R l \delta n \rho K,$$

де l – довжина робочого ланцюга живильника, м;

b – ширина зазору, м;

R_1 і R_2 – радіуси валків, м;

n_1 і n_2 – частота їх обертання, s^{-1} ;

K_1, K_2 , – коефіцієнти подачі тіста, що залежать від діаметру валка і консистенції тіста. Для тіста з пшеничного борошна I та вищого гатунків K становить 0,7 при $R=0,15$ м, при зменшенні R – знижується;

ρ – середня густина тіста, kg/m^3 .

Через те що тиск тіста на валкові робочі органи передається по нормалі, на підставі робочого тиску, що задається, і епюри його зміни по довжині робочої камери можна визначити сили, які діють на них в зонах живлення і розкачування:

$$P_n = 0,5 P_p R l \alpha$$

$$P_n = P_p R l \beta$$

Момент на валковому робочому органу створюється під дією тангенціальних сил P_n і P_n , що виникають внаслідок тертя тіста по валику і направлені в бік, протилежний напрямку обертання валиків.

$$M_n = 0,5 P_p R^2 l \operatorname{tg} \varphi$$

$$M_n = P_p R^2 k l \operatorname{tg} \varphi$$

де φ – кут тертя тіста по валковому робочому органу; для тіста пшеничного в залежності від рецептури і вологості становить $25-30^\circ$;
 $\operatorname{tg} \varphi$ (змінюється від 0,47 до 0,57).

Оскільки, валкові робочі органи зв'язані між собою зубчастою передачею і обертаються в різні боки, то їх крутні моменти складаються. В нашому випадку результуючий момент на приводному валу (в Н·м) становить

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

Для виконання вказаних розрахунків необхідно знайти раціональні конструктивні розміри валків, які відповідають проектній потужності на заданих сортах тіста. В даних розрахунках відсутні визначення впливу кута затягування (контакту) на розподілення стикованості маси тіста при нагнітанні, тобто в зонах вузла.

Будь яку із структурних схем існуючих та розроблених за участю валкових робочих органів можна математично описати за наявності рівнянь, що зв'язуються у часі безперервними функціями. До них відносяться геометричні розміри обладнання та характеристики робочих валків, а також властивості і фізико-механічний стан в'язкого середовища, що залежить від умов розкачування.

На основі розроблених підходів для опису процесу нагнітання тіста в зазорі між валками [4, 5, 6], було використано гідродинамічну теорію каландрування псевдопластичної рідини. Це дозволяє встановити кількісні залежності між геометричними характеристиками робочого простору (зазора) та властивостями матеріалів і режимів обробки. При використанні даної теорії процесу одержано ряд формул, що дозволяють визначити тиск в зазорі між валками, виходячи із параметрів та в'язкості середовища.

Визначені в результаті експерименту залежності описуються частковими алгебраїчними функціями. Для узагальнення часткових залежностей використано багатофакторну функцію Протодіяконова, застосування якої для обробки результатів хімічних досліджень [2, 6] дозволяє отримати адекватні результати.

Характеристики тіста з незруйнованою структурою досліджували приладом РВ–8. Досліди проводили при невеликих зусиллях зсуву, величина яких менша за граничне напруження зсуву, фіксуючи через кожні 10–20 секунд величини деформацій, які визначають по відхиленні стрілки. Знаючи геометричні характеристики приладу і дані вимірювання, розраховано напруження зсуву τ' :

$$\tau' = \tau - \tau_k = \frac{(m - m_0)gR_{шк}}{2\pi R_v^2 h_{пр}}$$

де m – маса вантажу, який обертає ротор. Складається з маси двох гирьок і маси чашок, кг (за виключенням величини, що компенсує тертя в підшипниках);
 m_0 – маса вантажу, при якій ротор починає обертатися. Відповідно [4] визначали пластичну в'язкість: $\mu_{пл} = (\tau - \tau^1)/\gamma$

Аналіз досліджень нагнітання тіста та показників роботи існуючих машин свідчить про складність процесу, недостатню стабільність і надійність роботи. Компоненти подаються в робочу камеру нерівномірно. Крім того, на якість нагнітання валками впливає цілий ряд інших факторів: фізико-механічні властивості сировини, режим роботи, недостатній імпульс зовнішніх сил в осьовому зміщенні та надмірна кількість робочих органів, тощо. Це пов'язано з тим, що конструкція, параметри робочих органів і кінематика руху їх ще недостатньо вивчені. Тому не зважаючи на значну кількість наукових напрацювань, актуальною проблемою залишається розробка нових більш перспективних технічних конструктивних рішень робочих органів, робочих камер з покращенням якісних показників виробів на основі побудови математичної моделі.

Як бачимо, визначення руху середовища в зазорі між валками є одним із досить складних і в той же час практично важливих проблем. Це пов'язане з необхідністю проведення різного роду розрахунків формуючих робочих валків у визначенні їх дії на середовище.

Вивчення робіт [1, 4, 5] показало, що нерівномірність швидкості руху середовища (бубличного, дріжджового, пшеничного тіста) обумовлена характером течії. Тому суттєвим фактором збільшення ефективності інтенсивної дії валків на тісто є рівномірність розкачування його елементарних об'ємів, що надходять із робочої камери машини. Виходячи із допущень, що питома подача середовища є однаковою для всіх елементарних об'ємів маси, що знаходяться в зазорі між валками, в'язкість залишається постійною і ми її при розрахунках враховували.

Розглянемо процес розкатування тіста між валками. Закономірність зміни товщини пласту тіста по ходу розкатки між валками приведено на рис. 3.5. При розкатуванні валками циліндричної форми товщина тіста постійно змінюється в середній частині пласта, тобто в зоні захвачування. На виході із валків – товщина однакова. Всі цикли розкачування валками криволінійної поверхні

Нехай $P(\varphi = 0) = P_0$ тоді : $P_0 = \frac{2\mu}{R} \int | + C \Rightarrow C_3 = P_0 - \frac{2\mu}{R} \int$

$$P_0 = \frac{2\mu}{R} \int \Big|_{\varphi=0} + C_3 \Rightarrow C_3 = P_0 - \frac{2\mu}{R} \int \Big|_{\varphi=0}$$

$$P(\varphi) = P_0 \frac{2\mu}{R} \int_0^\varphi \frac{\left(Q - \frac{\omega R h}{2} \right) d\varphi}{(R+h) \left[\ln \left(1 + \frac{h}{R} \right) - \frac{h}{2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R+h} \right) \right]}$$

Введемо позначення :

$$I_k(\varphi) = \int_0^\varphi \frac{h^k d\varphi}{(R+h) \left[\ln \left(1 + \frac{h}{R} \right) - \frac{h}{2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R+h} \right) \right]} \quad k = 0,1$$

$$I_1(\varphi) = \int_0^\varphi \frac{h^k d\varphi}{(R+h) \left[\ln \left(1 + \frac{h}{R} \right) - \frac{h}{2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R+h} \right) \right]}$$

Тоді:

$$P(\varphi) = P_0 + \frac{2\mu}{R} \left(Q I_0(\varphi) - \frac{\omega R}{2} I_1(\varphi) \right)$$

Вилучимо змінну Q з умов, що розподіл тиску є періодичною функцією кута φ , тобто:

$$P(\varphi + 2\pi) = P(\varphi)$$

частковому випадку $\varphi \left(\frac{\pi}{2} \right) = P(0) = P_0$ отже:

$$P = P_0 + \frac{2\mu}{R} \left[Q I_0 \left(\frac{\pi}{2} \right) - \frac{\omega R}{2} I_1 \left(\frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (3.8)$$

З рівняння видно, що величина розміщення маси тіста (кут поверхні зтягування маси на валку) значною мірою визначає величину тиску. Функція $P(\varphi)$ залежить від кута, а не від часу-тому похідні не будуть характеристиками

швидкості та прискоренням процесу ущільнення. Вводимо додаткові функції, що розкривають дискретність процесу нагнітання:

$$F(\varphi) = \ln\left(1 + \frac{h}{R_2 \cdot \sin(\varphi)}\right) - \frac{h}{2} \cdot \left(\frac{1}{R_2 \cdot \sin(\varphi)} + \frac{1}{R_2}\right)$$

$$L(\varphi) = Q - \omega \cdot R_2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \frac{h}{2}$$

Враховуючи наші дані та використавши (8) побудовано графік рис. 3.6.

Як бачимо, функція $P(\varphi)$ визначена для кута φ від 0,1277 до 0,8034 рад. Вона характеризується трьома ділянками в залежності від кута φ (рис.5.6). Перша ділянка (початок процесу) φ від 0,8034 до 0,65 радіан (процес затягування і ущільнення). Він характеризується зменшенням $P(\varphi)$ від $0,705 \cdot 10^4$ до $0,229 \cdot 10^4$. При цьому відбувається нелінійне зменшення похідної $\frac{dP(\varphi)}{d\varphi}$ та нелінійне зменшення другої похідної $\frac{d^2P(\varphi)}{d\varphi^2}$ до 0. Друга ділянка вказує на стабілізацію процесу де φ знаходиться від 0,65 до 0,24 радіан. Вона також характеризує часткове зменшення P від $0,229 \cdot 10^4$ до $0,145 \cdot 10^4$. Відповідно відбувається лінійне зменшення похідної $\frac{dP(\varphi)}{d\varphi}$ та другої похідної $\frac{d^2P(\varphi)}{d\varphi^2}=0$ (або невизначена). Третя ділянка при φ від 0,24 до 0,1277 радіан: функція $P(\varphi)$ зменшується від $0,145 \cdot 10^4$ до 0; нелінійне збільшення похідної $\frac{dP(\varphi)}{d\varphi}$; нелінійне зменшення другої похідної $\frac{d^2P(\varphi)}{d\varphi^2}$ від 0.

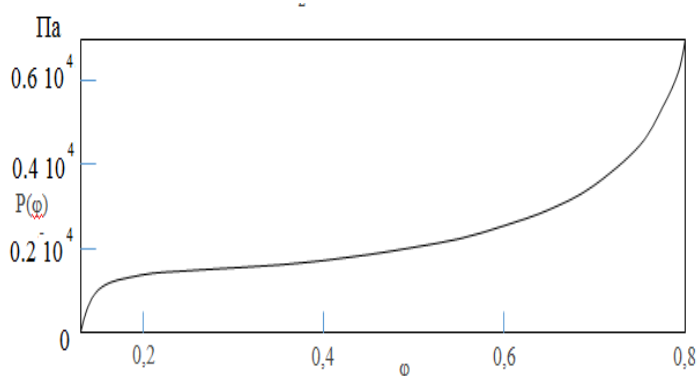


Рис.3.6. Графік залежності тиску від кута затягування φ .

Із вище наведеного обґрунтованого впливу взаємодії валка з тістом випливає, що оптимальна пружність тіста істотно залежить від співвідношення заданих величин утвореного стискання між ними. Дуже слабо залежить від температури навколишнього середовища в діапазоні температур t_0 від 20°C

до 35°C. З огляду на те, що проходить зміна стискання тіста з відхиленням, а відповідно структурно-механічні властивості тіста, використовуючи математичну модель (3.8), ми визначили вплив оптимального рівня стискання тіста на структуру готової продукції. При цьому використано дослідні дані зміни величин в'язкості по відношенню з плинном кута затягування маси тіста. Встановлено, що дана величина коливається в малих значеннях, так в'язкість тіста на початку дискретної дії валків має незначні зміни. Таким чином конструкція поверхні нового валка дозволила при однакових технологічних параметрах зменшити вплив на тісто і тим же, покращити якість формування. При цьому, зменшуються втрати сухих речовин, технологічний брак. Графічна залежність оптимального ступеня стискання тіста від співвідношення заданих величин зміни в'язкості з плинном кута затягування побудована на рис. 3.7. Одночасно відображено зміна структури готових бубликів згідно дискретності процесу нагнітання, по розробленій методиці [7].

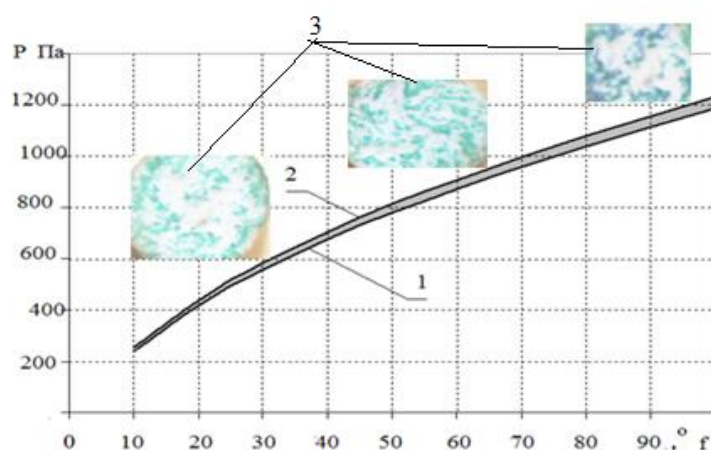


Рис. 3.7. Вплив кута затягування тіста на його стискання при нагнітанні на другій дільниці: 1 – стискання після багатьох циклів дискретності; 2 – стискання на початку дії валків; 3 – структура готового бублика

З графічної залежності (рис. 3.7) випливає, що стискування маси тіста відбувається при поступово змінному тиску. Дана величина коливається в малих значеннях і для в'язкості тіста на початку дискретної дії валків є незначною. Це наглядно видно із структури бублика. Таким чином конструкція поверхні нового валка дозволила при однакових технологічних параметрах зменшити вплив на тісто і тим же, покращити якість формування. При цьому, зменшуються втрати сухих речовин, технологічний брак.

Дана модель дозволяє визначати стискуваність тіста на початкових і кінцевих значеннях в'язкості при додержанні заданих технологічних і конструктивних параметрах (температура, рецептура, форма поверхні валка).

Наведений аналіз дає можливість бути основою для розробки інженерної методики проектування робочих органів по регулюванню стабільності процесу.

3.4.1. Визначення швидкості течії тіста в процесі нагнітання

В результаті 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. За рахунок адгезії і своїй шерохватій поверхні, валок покритий шаром тіста. Цей шар на кожній ділянці має різну товщину δ . Особливо важливу роль відіграє стискання, що регулює товщину шару в'язкого тіста на валку. Залишковий шар затримується і одержує зворотній напрям руху. В результаті таких дій відбувається часткове перемішування, що триває короткий період і переходить в спокійну течію тіста. Одночасно відбувається релаксація тістової маси, яка знову захоплюється валком і затягується в дільницю нагнітання.

За умов нагнітання тіста валками, говорити про зменшення відстаней між молекулами біополімерів у його складі недоцільно, оскільки для цього потрібен надто високий тиск. Тому вважаємо, що об'єм завантаженого тіста в робочу камеру зменшується тільки внаслідок стискання валками і подальшого розчинення у рідкій фазі тіста газових пухирців.

Введемо циліндричну систему координат x, y, z , вісь z якої проходить через центр валка. В результаті симетрії всі компоненти дотичних напружень рівні між собою (рис. 3.5).

Процес руху маси тіста під дією валків можна розділити на два етапи. На першому етапі на валок з тістом при рівномірному русі на ділянці його затягування діє сила тяжіння $G=mg$, під дією невеликих відцентрових сил F , яка буде:

$$F = mv^2_r / (R + r)$$

де m – маса шару тіста, що знаходиться на валку, кг;

r – радіус обертання шару тіста, тобто віддаль від радіусу валка R до центру обертання маси тіста, м.

При обертанні валка захоплюються шари тіста, які під дією відцентрових сил починають рухатися до зони нагнітання, що переміщає всю масу по осі X . Будемо вважати, що течія шарів тіста радіальна, та $U_x \gg U_y$. Швидкість U_z із усіма похідними по z нехтуємо. На виході із формуючого каналу тістова маса не зустрічає опору, тобто $\Delta P = 0$.

В масі тіста виникають пружно пластичні деформації, які з часом переходять в пластичні. Тому виникаючі зусилля порівняно невеликі і основним технологічним параметром процесу течії є товщина тіста. При цьому сили в'язкого тертя співрозмірні з силами власної ваги тіста. На другому етапі проходить течія утвореної пластичної області, яка спостерігається в середній частині валка. Утворення пластичної деформації найбільше відбувається і досягається в області нагнітання. При цьому, виникають відцентрові сили інерції:

$$F_{in} = \rho \omega^2 r$$

де ρ – густина, кг/м³;

ω – кутова швидкість валка, рад/с;

r – текуче значення радіуса, м.

Вважаємо, що дія сил інерції подібно дії внутрішнього тиску, рівномірно розподілена по суміші радіусом R . Рівнодіюча сил при будь-якому положенні маси тіста на валку в зоні його затягування, нагнітання проходить через одну і ту ж точку горизонтальної осі валка. Ця точка визначає товщину шару тіста на валку, що нагнітається.

Із досліджень В. В. Соколовського, тиск P_0 утворений на внутрішнім контурі вперше появляється при пластичних деформаціях [3]. Тому у нашому випадку:

$$P_0 = \frac{\sqrt{3} \cdot \tau_0 \cdot (R_2^2 - R_1^2)}{\sqrt{3R_2^4 + R_1^4}}$$

де τ_0 – граничне напруження зсуву, Па;

R_1 – радіус валка, м;

R_2 – радіус валка з шаром тіста на ньому, м.

В результаті виникнення пластичної деформації, утворюється пластична зона радіусом r . За цим радіусом утворена суміш залишається пружною.

Із збільшенням внутрішнього і зовнішнього тиску, який постійно присутній в даній стадії, пластична течія розповсюджується по всьому об'єму. Критична швидкість обертання шару тіста, при якій вперше настає пластична деформація в масі тіста, має вигляд:

$$\omega_{кр} = \left\{ \left[\sqrt{3} \cdot \theta_0 \cdot (R_2^2 - R_1^2) \right] / \rho \cdot R_1 \sqrt{3R_2^2 + R_1^2} \right\}^{0.5}, \text{ рад/с}$$

де R_1 – радіус валка;

R_2 – радіус валка з шаром тіста на ньому;

ρ – густина тіста.

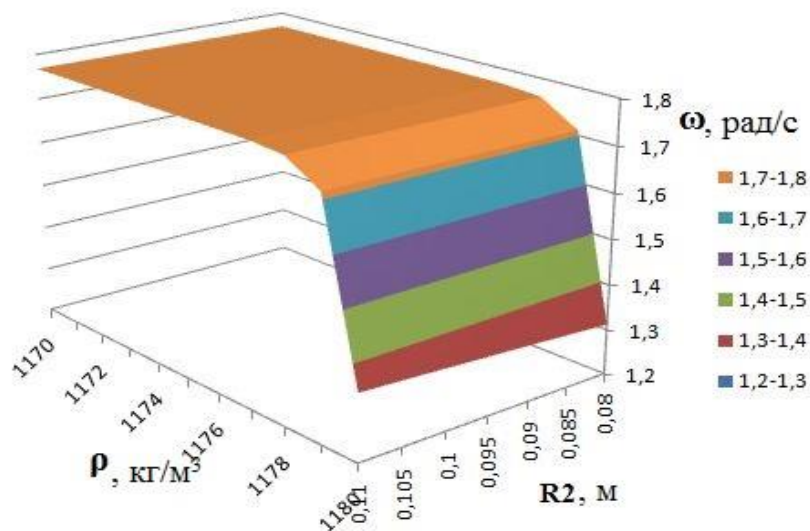


Рис. 3.8. Залежність критичної швидкості обертання шару тіста на валку від його густини та радіуса валка з шаром тіста на ньому

При будь-якій швидкості течії тіста між валками існує зв'язок між температурою, прикладеною напругою, тиском, з одного боку і в'язкістю, еластичністю, з іншого. Так як між нашими розрахунками критичної швидкості та вимірними значеннями і реологічними параметрами є взаємозв'язок, то можна визначити рух тіста в зазорі між валками. Отримані та розраховані результати зведені в таблицю (див. додаток Б).

За отриманими даними побудовано криву плинності швидкості (рис. 3.8). Аналізуючи криву швидкості течії тіста, можна відзначити два параметри, що описують структурно-механічні властивості. Так, починаючи з швидкості 1,3 рад/с і напруження зсуву 1,02 кПа, відбувається початок зміни параметрів. Починаючи з швидкості 1,7 і напруження зсуву 3,92, течія тіста одержує пряму лінію, яка описує переміщення тіста між валками на ділянці нагнітання. Отримані результати дають можливість проводити розрахунки для визначення швидкості руху тіста при стисканні.

3.5. Методика визначення оптимальних параметрів валкового нагнітання

Будь яку із структурних схем за участю валкових робочих органів можна математично описати за наявності рівнянь, що зв'язують у часі безперервними функціями геометричні розміри обладнання, властивості і фізико-механічний стан в'язкого середовища залежно від умов розкачування, а також геометричних і кліматичних характеристик робочих валків.

Узагальнену математичну модель процесу розкачування можна подати системою диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\mu}{dt} = f_{\mu}(t, v, T, \rho, P); \\ \frac{dv}{dt} = f_v(t); \\ \frac{dA}{dt} = f_A(J, M, t, x, T, \mu, \rho); \\ \frac{d\tau}{dt} = \frac{dP}{dx}; \frac{dv_x}{dx} + \frac{dv_y}{dy} = 0; P = P(x). \end{array} \right. \quad \frac{dJ}{dt} = f_J(\mu, r, t, v, x, \rho)$$

де J – інтенсивність механічної дії валків на середовище;

$P_{(x)}$ – тиск;

x – координата в напрямку зміни градієнта швидкості зсуву;

T – температура;

M – параметр механічних властивостей середовища;

v – швидкість обертання валків;

μ – в'язкість;

A – питома робота розкачування;

τ – дотичне напруження.

Зрозуміло, що розв'язання такої системи можливе за певних початкових і граничних умов, які визначають стан середовища, параметри механічного впливу.

Нерівномірність швидкості руху тіста (бубличного дріжджового пшеничного) обумовлена характером течії (рис. 3.8). Тому суттєвим фактором збільшення ефективності інтенсивної дії валків на тісто є рівномірність розкачування його елементарних об'ємів, що надходять із робочої камери машини.

Дані та їх методи дозволяють систематизувати матеріали досліджень, виявити та сформулювати задачі та ціль розрахунку. 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. Для дослідження процесу в певному діапазоні розходу середовища запропоновано блок – схему моделювання геометричних обмежуючих параметрів градієнтного поля течії в'язкої рідини (рис. 3.9, 3.10). Метою схеми є оптимізація розходу середовища в технологічному процесі валкового нагнітання.

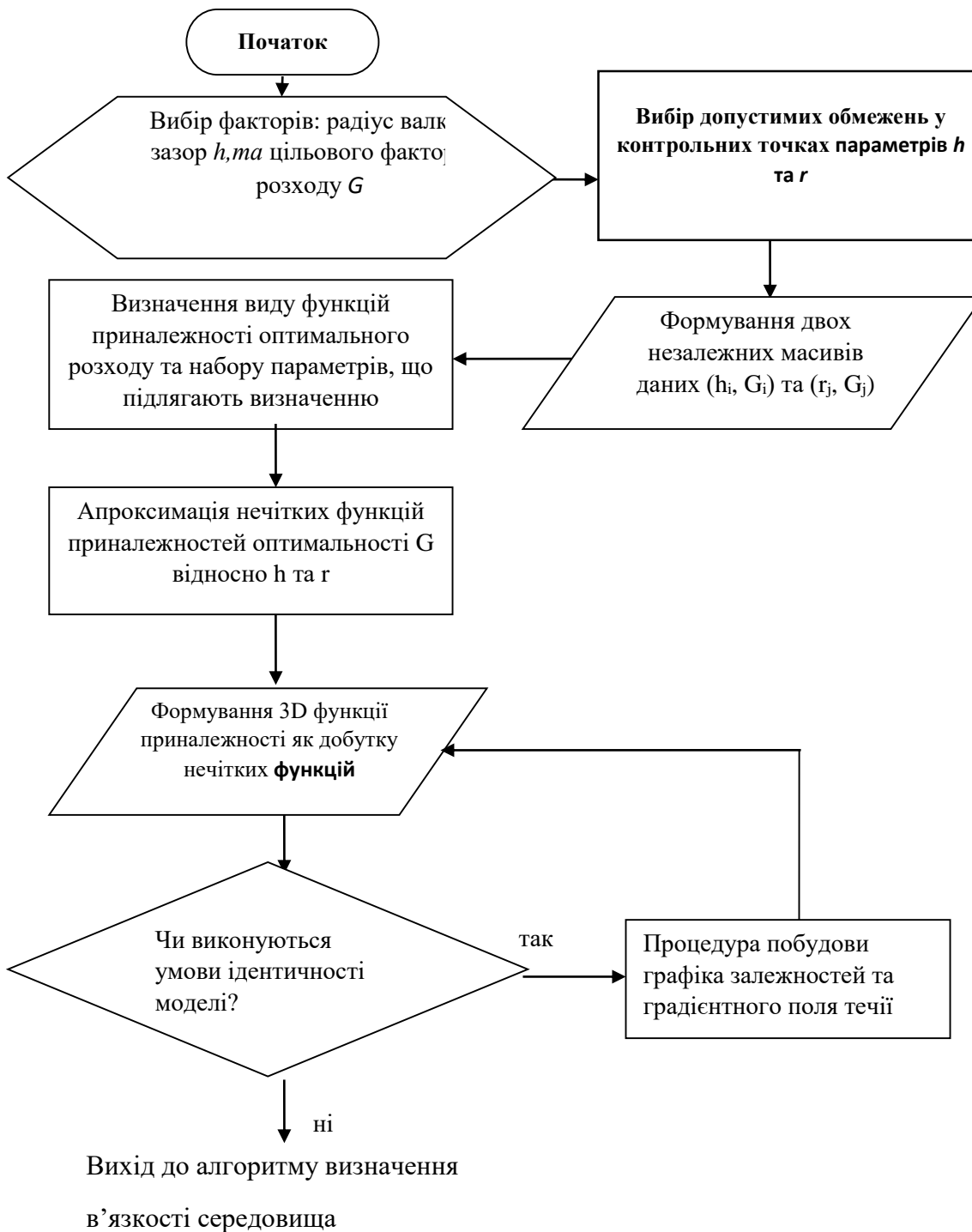


Рис. 3.9. Моделювання в'язкості у точках потоку в процесі нагнітання тіста валками

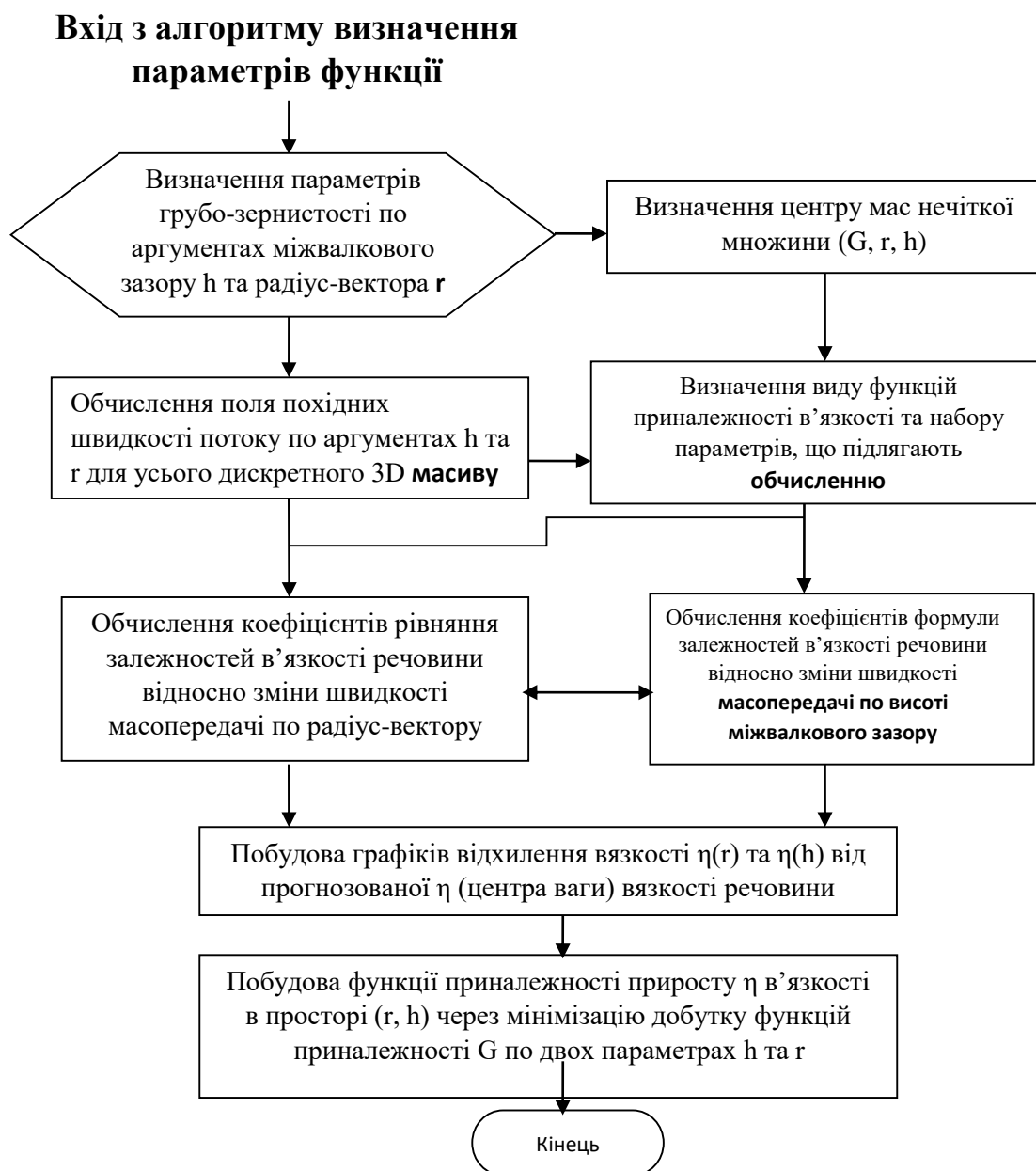


Рис. 3.10. Блок-схема технологічного розходу середовища при дії однакового діаметра валків

Розглянемо процес нагнітання (рис. 3.11). Валки однакових діаметрів обертаються назустріч один одному при стаціонарному, ізотермічному русі середовища (пшеничного тіста).

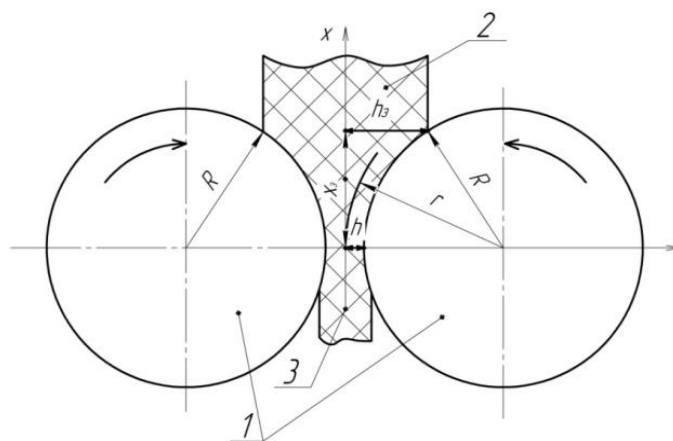


Рис. 3.11. Профіль схеми нагнітання тіста між валками: 1 – обертові валки радіуса R , половинна відстань між якими h ; 2 – потік тіста на вході робочої камери; 3 – розкатане тісто після проходження валків

Інерційними властивостями ми нехтуємо. Витрата середовища є нечіткою (розмитою), в основі її величини є із центром ваги G . Вид такої функції має вигляд:

$$J(\text{Par}, A, B) = e^{A \cdot (B - \text{Par})^2} \quad (3.9)$$

Її значення шукатимемо у виді експотенціальної симетрії відносно точки аргументу (параметрів робочого процесу Par). Тобто, такого, що: $J(\text{Par})=G$. Невідомі коефіцієнти в рівнянні (3.9) A та B будуть визначені для кожного випадку функції приналежності J методом найменших квадратів. Розв'язування рівняння проводимо по основних конструктивних параметрах (h , r), що впливають на ефективність процесу розкачування.

Теоретичні результати розрахунку для випадку дії зазору між валками.

Проводимо дослідження параметрів функції приналежності $J_\mu(h)$ теоретичної швидкості витрати $G(h)$ в'язкого середовища на валках відносно зазору h між ними у мм. Формуємо розподіл нечіткої величини витрати J_μ по параметру зазору h на інтервалі 1 ... 5.5мм по приналежності даного фактору 0.62 близького до центру зазору. У даному випадку найвищий рівень досягає 0.92, що маємо по центру рухомого середовища при $h=3,6$ мм, який визначалося серією замірів.

Заміри проводили після кожного циклу нагнітання маси тіста на формувальній пристрої. Відбирали сформовані заготовки і їх зважували. Відповідно мали картину руху маси тіста в зазорі між валками при однакових

діаметрах та частоті обертання. Два центральні сформовані шматки тіста мали майже однакову вагу, а заготовки сформовані боковими пристроями мали деякі відхилення. Тому по краях рівень найменший, рівний 0,1.

$$\text{Тоді, } J_{\mu} \begin{pmatrix} 1 & 2.5 & 3 & 3.6 & 4.5 & 5 & 5.5 \\ 0.1 & 0.26 & 0.48 & 0.92 & 0.4 & 0.22 & 0.1 \end{pmatrix}$$

Для практичного використання виразу (3.9) необхідно обчислити конкретні значення параметрів А та В. Використовуємо оператор найменших помилок програми MathCAD-14 для їх відшукування. Надаємо найбільш близькі до експертних початкових значень для використання блоку Given-Minerr
 $n := \text{cols}(J_{\mu}); n := 7; B := 3.6; A := -0.01$

$$\begin{aligned} \text{Given } \sum_{i=0}^{n-1} (J_{\mu_{1,i}} - G(J_{\mu_{1,i}}, A, B))^2 = 0 \\ \left(\frac{A_h}{B_h}\right) := \text{Minerr}(A, B) \quad A_h = -0.954 \\ B_h = 3.718 \end{aligned}$$

Таким чином теоретична залежність швидкості витрати в'язких мас згідно розрахунків, має вид:

$$G(h) = e^{-0.95 \cdot (3.72 - h)^2} \tag{3.10}$$

На основі проведених розрахунків будемо графік функції $G(h)$ згідно даних.

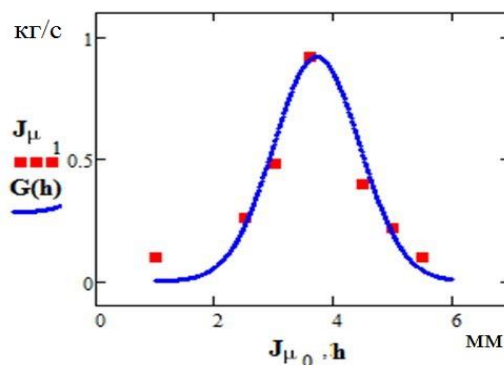


Рис. 3.12. Функція приналежності $G(h)$ витрати J_{μ} в'язкого середовища по площині валків (h_0x)

На рис. 3.12 точками представлено графік обчислених теоретичних величин, а квадратиками – дослідні дані з валкової машини. Із графічної залежності випливає, що дійсно зазор є впливовою величиною на якість процесу. Свої найсприятливіші значення функція витрати для міжвалкового зазору h має в межах 3...4.2 мм. Ці значення визначають ефективність процесу розкачування. Теоретичні розрахунки показали, що їх величини є досягненням точності взаємозв'язку витрати із зазором. Порівняння з дослідними даними достатньо співпадають з розподілом середовища в зазорі по довжині валків.

Функцію приналежності витрати $GG(h)$ у площині валків шукаємо як нормовану величину. Проводимо перевірку нормування по стандарту $G=9.7$ (дослідні дані) і підбираємо C у формулі функції приналежності, вибираючи інтервал зміни аргументу h : $h_0=1 \dots h_m=7$:

$$S := \int_{h_0}^{h_m} GG(h) dh \quad (3.11)$$

$$S = 9.664$$

Виходячи із розрахунків випливає, що підбір наших констант задовільняються початковими умовами накладеними на витрату $G=S$ із відповідним технології ступенем точності.

$$GG(h) := \begin{cases} C \cdot (1 - G(h)) & \text{if } 0 \leq h \leq 7 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.12)$$

Теоретичні результати розрахунку для випадку дії параметрів радіус-вектора точки в'язкого середовища відносно осі валків.

Проведемо оцінювання параметрів функції приналежності швидкості нечіткої величини витрати в'язкого середовища між валками відносно модуля радіус-вектора, що сполучає вісь валка і точки в'язкого середовища. Спостереження точки на струмені витрати у площині валка фіксуємо в мм. Принцип обчислень аналогічний пункту 1.

$$F_{\mu} \begin{pmatrix} 155 & 158 & 161 & 164 & 167 & 170 & 175 \\ 0.14 & 0.36 & 0.68 & 1 & 0.66 & 0.32 & 0.11 \end{pmatrix}$$

$$n := \text{cols}(F_{\mu}); n := 7; V := 164; A := -0.1$$

$$\text{Given } \sum_{i=0}^{n-1} (F_{\mu_{1,i}} - G(F_{\mu_{1,i}}, A, B))^2 = 0$$

$$\left(\frac{A_r}{B_r}\right) := \text{Minerr}(A, B) \quad A_r = -0.032$$

$$B_r = 163.862.$$

Функцію приналежності витрати GG(r) у площині валків шукаємо як нормовану величину. Проводимо перевірку нормування по стандарту G=9.7 і підбираємо СС у формулі функції приналежності, вибираючи інтервал зміни аргументу r: r₀=155...r_m=175. Отримуємо формулу залежності витрати середовища від параметру r:

$$GG(r) = 0.99 \cdot e^{-0.032 \cdot (163.9-r)} \quad (3.13)$$

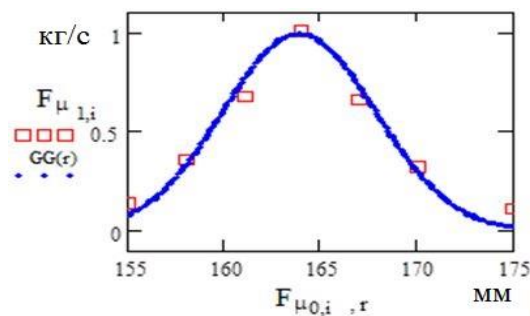


Рис. 3.13. Графік залежності витрати середовища від радіус-вектора точки середовища відносно осі валка

Графік залежності приведений на рис. 3.13 свідчить про найвищу ступінь приналежності в межах 162...168 мм.

Забезпечення умов спільного виконання впливу параметрів зазору h та радіус-вектора r.

Операція визначення функції приналежності по спільному впливу двох факторів виконується шляхом логічного добутку приналежностей через мінімізацію двох визначених функцій по двовимірній області двох факторів r та h.

$$GG(h,r) = \min(GG(h), GG(r)), \quad (3.14)$$

Для забезпечення точності розрахунків вирішуємо проблему грубозернистості аргументу шляхом вибору числа N кількості точок поділу діапазону зміни r та h. Графіки нечіткої функції витрати середовища по області

зміни двох аргументів на площині (r, h) приведені на рис. 3.14(а) – тривимірний та 3.14(б) – лінії рівня. Нижня та верхня грані графіку відповідають відповідно поверхневому та між поверхневому руху середовища міжвалками.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що біля поверхні валків відбувається найбільший рух тіста, який змінюється по параметру зазору h в сторону зменшення центральної міжвалкової осі. Цей особливий рух тіста можна розділити на дві стадії. Перша – це адгезійний контакт середовища із поверхнею валків з отримання валкової обертової швидкості. Вона змінюється з віддалю від валкової поверхні. На цій стадії рух визначальним фактором є діаметри валків. Друга стадія руху – міжвалковий змінний рух кількості тіста. На цій стадії утворюється своєрідний рух, де присутня досить велика впадина і рух має частково протилежний характер (рис. 3.14). Визначальним параметром є зазор.

На основі запропонованої методики обґрунтовано функціональні залежності допустимого діаметру та зазору, який теоретично знаходиться в межах конструктивних параметрів: діаметр валків 155...165мм; зазор 15...34мм. Запропоновану методику визначення характеру руху середовища можна використовувати при проектуванні валкового нагнітача при подачі маси тіста (формувальні, тістоподільні машини), при дозуванні та. ін.

Результати досліджень є суттєвим внеском в дослідження гідромеханіки нелінійних середовищ, сприяють розвитку теоретичних основ процесу інтенсивного руху. Рух симетрично знижується в процесі дії валків, але свої максимальні значення має біля їх поверхонь, що підтверджує активний адгезійний вплив.

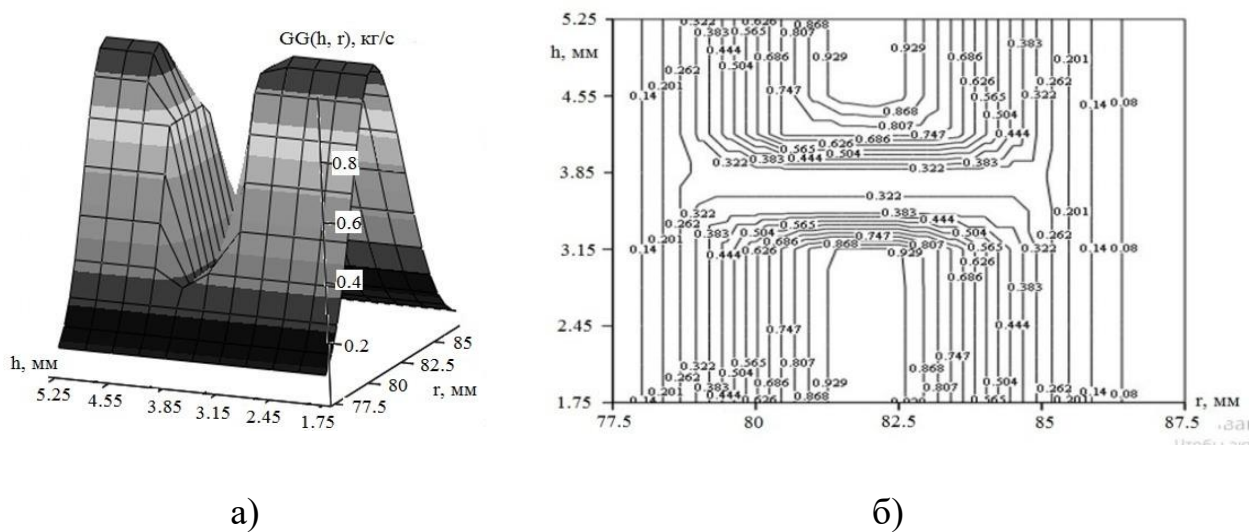


Рис. 3.14. Графіки нечіткої функції витрати середовища:
а – тривимірний; б – лінії рівня

3.6. Аналітична модель руху тіста при дії кута захвату валків

В машинобудуванні необхідний точний розрахунок характеристик робочих процесів для оптимальних конструкторських і технологічних рішень, що направлені на збільшення надійності, покращення експлуатаційних характеристик машин, зниження енергоємності, покращення екологічної безпеки.

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, під яким розуміється одержання із маси тіста заготовки відповідної форми. Для різного тіста в різній мірі може бути застосований той або інший вид дії валків.

Виходячи із фізичної суті механізму формування, характеру розвитку деформації тіста і молекулярно-механічної теорії тертя [3], запропонованої для дослідження сил тертя і зносу деталей машин, розглянемо процес розкачування та нагнітання тіста новими валками.

Із загальної маси тіста, що знаходиться в завантажувальному бункері і під дією власної ваги, частина його поступає у вузол нагнітання. Валкові робочі органи в даному процесі змінюють переміщення маси тіста. В'язка маса отримує рух направленного потоку.

Швидкість тіста (рис. 3.15) по поверхні валків відповідно до інженерної практики, може бути визначено за формулою [2]:

$$v_0 = v_B (\cos \varphi - f \sin \varphi) \quad (3.15)$$

де v – швидкість валка;

f – коефіцієнт тертя в'язкопластичної маси;

φ – кут контакту (30°).

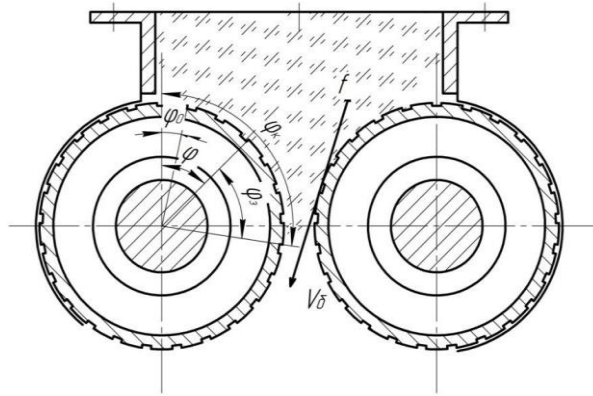


Рис. 3.15. Схема зміни кута контакту з тістом по поверхні валка

Кут φ контакту буде змінюватися при переміщенні маси по поверхні валка. При збільшенні φ , як видно з формули (3.15), v_0 – зменшується. При таких умовах:

$$\varphi = \varphi_k = \arctg \frac{l}{f} \quad (3.16)$$

маса тіста не контактує із поверхнею валка. Таким чином φ_k є максимально можливим кутом захвату тіста, що залежить від напрямку переміщення його маси.

В даному випадку, довжина направляючої (контактної зони валка)

$$L \leq \frac{\varphi_k}{180^\circ} \pi R \quad (3.17)$$

де R – радіус валка.

Тривалість t повороту тіста на заданий кут визначається із рівняння:

$$t = \int_{\varphi_0}^{\varphi_k} \frac{R d\varphi}{v_B} \quad (3.18)$$

Підставивши у рівняння (5.17) значення v_0 із формули (5.15), після перетворення одержимо:

$$t = \frac{R}{v_B \sqrt{1 + f^2}} \ln \frac{\operatorname{tg} \left[\frac{1}{2} (\varphi_k - \varphi_3) \right]}{\operatorname{tg} \left[\frac{1}{2} (\varphi_0 - \varphi_3) \right]}, \text{ с.} \quad (3.19)$$

де φ_k – кут контакту тіста з валком;

φ_3 – кут затягування;

φ_0 – кут між стінкою і початком затягування тіста валком.

Розв’язок рівняння (3.18) і (3.19) дає можливість визначити час дії валків на тісто, приймаючи величину сили тертя $f = 6\pi R$.

Після спрощення даний вираз тривалості (3.19) приймає вигляд:

$$t = \frac{50(\ln(\operatorname{tg}(0.5 \cdot \varphi_k - 013))) + 136.25}{\sqrt{f + 1}} \quad (3.20)$$

Для того, щоб тісто рухалось по направляючій поверхні валка із забезпеченням відповідного циклу дискретності при розкачуванні, необхідно задавати цей інтервал. Тривалість проходження t попереднім тістом вздовж направляючої поверхні валка на віддаль L від точки початкового нагнітального контакту до його виходу із дії валка, повинна бути менша.

$t_n + t_s$ – відповідно тривалості течії слідуючої маси тіста до точки нагнітання і переміщення її на віддаль $(L-S)$. В даному випадку S – довжина дуги, відсікаюча радіусом валка із центру кривизни направляючої до формувального моменту. Таким чином тривалість руху тіста на кут

$$\varphi_k = \frac{180^\circ}{\pi R} L \quad (3.21)$$

не повинна перевищувати його для кута

$$\varphi_k = \frac{180^\circ}{\pi R} (L - S) \quad (3.22)$$

Для відповідних кутів повороту t_s і t_L визначається за формулою (3.23). Якщо позначити T віддаль між дискретністю дії валків на тісто, то час підходу кожного наступного шару тіста по направляючій поверхні визначається виразом:

$$t_n = \frac{T}{v_6} \quad (3.23)$$

В такому разі умова збереження гарантованого інтервалу дії валка на течію маси тіста, що рухається до формування, буде визначатися нерівністю:

$$T > v_6(t_L - t_S)$$

При заданій продуктивності машини Q , допустимий кут φ_k , який сприяє повороту тіста, щоб забезпечити цю продуктивність, можна описати залежністю:

$$\varphi_n \leq \varphi_3 - (\varphi_3 - \varphi_0) \operatorname{arc} \cdot \operatorname{tg} \left[\exp \left(\frac{v_6}{RQ} \sqrt{1 + f^2} \right) \right] \quad (3.24)$$

При цьому максимальна довжина контакту тіста із направляючою поверхнею валка: $L \leq \frac{\varphi_n - \varphi_0}{180^\circ} \pi R$.

З рисунка 3.16 випливає, що значення радіуса валка при однаковій кутовій швидкості тіста з різними кутами взаємодії φ_k , визначає відповідний час його руху. Використання запропонованої методики визначення характеру руху можна використовувати при проектуванні валків (тістоподільні машини, формувальні машини, розкочувальні). Час симетрично знижується в процесі нагнітання, але свої максимальні значення має біля поверхні валка. Характер дії суттєво залежить від діаметру, частоти обертання, поверхні та осьової віддалі між валками.

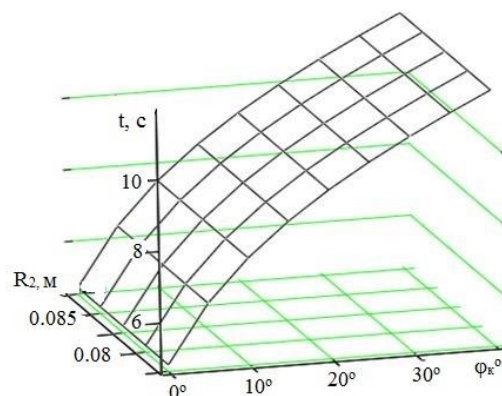


Рис. 3.16. Графік залежності тривалості t повороту в'язкого тіста від кута φ_k на валку при різних радіусах R_2

3.6.1. Визначення характеристик тіста при деформації

Наведені попередньо матеріали зорієнтовані у більшості на термодинамічні перетворення і стосуються тіста з подальшими деформаційними впливами на нього. Початкові умови тіста характеризуються значеннями $24,2 \pm 2^\circ\text{C}$, а за умов формування – $30 \pm 2^\circ\text{C}$. Важливе значення має ретельність обминання тіста при формуванні. З нього частково, як було описано, видаляється діоксид вуглецю та інші продукти бродіння. При цьому покращуються умови життєдіяльності дріжджів, підвищується їх бродильна активність, еластичність тіста. Останні впливають на формостійкість заготовок бутика при транспортуванні, температурній обробці у обшпарювальній ванні й випіканні. Всі технологічні операції визначають об'ємний вихід виробів і якість структури м'якушки [49, 50].

Як відзначалося раніше, тісто за своїми властивостями відповідає пружності твердого тіла і, одночасно, рідині за ознакою текучості (розпливання). Співвідношення цих властивостей визначається складом і станом борошна – крохмалю, білків, клітковини, які гідратуються у присутності води з утворенням колоїдної системи, а також вмістом низькомолекулярних сполук цукрів, жирів, амінокислот тощо [37].

Дослідження з використанням альвеографа встановили, що додаткова обробка тіста розкачувальними валками перед його завантаженням в робочу камеру та сама дія валкового вузла впливає на деформацією диспергованої фази. При дії змінних тисків (стискання середовища) покращується пружність та еластичність тіста, збільшується витрата питомої енергії на його деформацію. Відповідно змінюється його структурно-механічні властивості, які залежать від числа циклів нагнітання.

Величини розтяжності і пружності перебувають в прямій залежності від контакту тіста, товщини й площі контакту ВРО, кількості циклів за період нагнітання маси тіста з робочої камери. Дослідженнями підтверджено висунуті передумови й оптимальну, теоретично обґрунтовану залежність впливу деформації на якість тіста. Результати взаємодії факторів, що визначають структурно-механічні властивості маси тіста під час його нагнітання на протязі усього дискретного циклу, представлені в таблицях 3.1–3.3.

Таблиці 3.1 і 3.2 в яких представлені результати дослідження циліндричного валка з насічками та з прямими пазами, свідчать про зміну властивостей тіста з плином часу, тобто в сторону зменшення, після збільшення дискретності дії валків.

Результати досліджень по визначенню розтяжності і пружності тіста при нагнітанні циліндрично-гвинтовими валками, представлені в таблиці 4.3, мають плавний характер своєї зміни.

Таблиця 3.1

Для зношених валків з прямими пазами з насічками

Число циклів обробки	Пружність, Р, мм	Розтяжність, L, мм	Р/ L	Питома робота деформації, $W \cdot 10^4$, Дж
Контроль (без обробки)	85	68	1,25	238,06
$n_{\text{цикл}} = 180$	105	82	1,28	316,54
$n_{\text{цикл}} = 360$	120	95	1,26	434,3
$n_{\text{цикл}} = 540$	125	110	1,14	545,4
$n_{\text{цикл}} = 720$	115	97	1,185	616,1
$n_{\text{цикл}} = 900$	105	92	1,141	692,3

Таблиця 3.2

Пружно-еластичні властивості тіста з додатковою механічною обробкою для нових валків з прямими пазами

Число циклів обробки	Пружність, Р, мм	Розтяжність, L, мм	Р/ L	Питома робота деформації, $W \cdot 10^4$, Дж
Контроль (без обробки)	85	68	1,25	238,06
$n_{\text{цикл}} = 228$	105	86	1,22	316,54
$n_{\text{цикл}} = 456$	120	96	1,25	238,06
$n_{\text{цикл}} = 684$	130	98	1,32	197,6
$n_{\text{цикл}} = 912$	125	110	1,136	589,42
$n_{\text{цикл}} = 1140$	115	102	1,127	763,07

Таблиця 3.3

Пружно-еластичні властивості тіста з додатковою механічною обробкою для циліндрично-гвинтових валків

Число циклів обробки	Пружність, Р, мм	Розтяжність, L, мм	P/ L	Питома робота деформації, W·10 ⁴ , Дж
Контроль (без обробки)	85	68	1,25	238,06
n _{цикл} = 252	105	86	1,22	316,54
n _{цикл} = 504	117	98	1,19	654,2
n _{цикл} = 756	130	120	1,08	836,5
n _{цикл} = 1008	145	130	1,115	764,3
n _{цикл} = 1260	142	127	1,118	752,9

Порівняльні характеристики результатів взаємодії факторів, що визначають структурно-механічні властивості маси тіста підчас його нагнітання на протязі усього дискретного циклу, представлені на рис. 3.17–3.18.

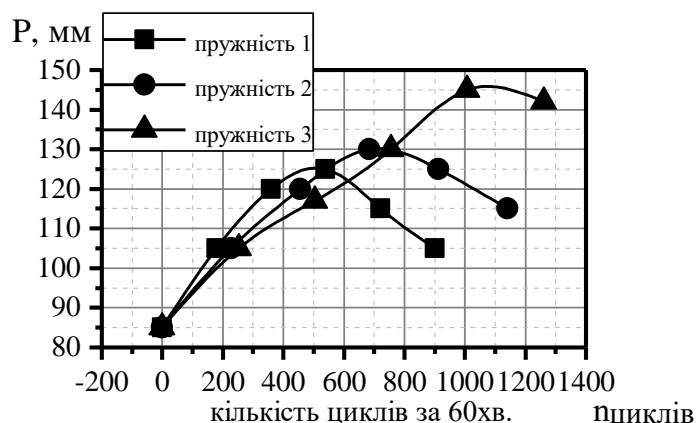


Рис. 3.17. Графіки залежностей пружності Р від числа циклів обробки:

1 – валка з насічками; 2 – циліндричного валка з пазами;

3 – циліндрично-гвинтового валка.

Із рис. 3.17–3.18 видно, що геометричні і конструктивні параметри валка впливають на пружні властивості і розтягування тіста. Так, при завантаженій робочій камері тістом масою 40кг на валках з насічками спостерігаються

найкращі показники до 540-го циклу і тривалості 35 хв. Після тривалості 35 хв, відбувається структурна зміна тіста, а відповідно, змінюються і структурно-механічні властивості. При роботі циліндричних валків з пазами уже на 30 хв, але 584-му циклі деформації відбувається зміна структури. В свою чергу при нагнітанні тіста циліндрично-гвинтовими валками структурно-механічні властивості тіста залишаються не змінними до 50 хв і 1008 циклу обробки і тільки після даного часу, вже на кінці роботи починаються в незначній мірі зміни. Це пояснюється тим, що деформація тіста, при роботі нової конструкції валків не зазнає температурних впливів, тобто відсутній негативний вплив – тертя.

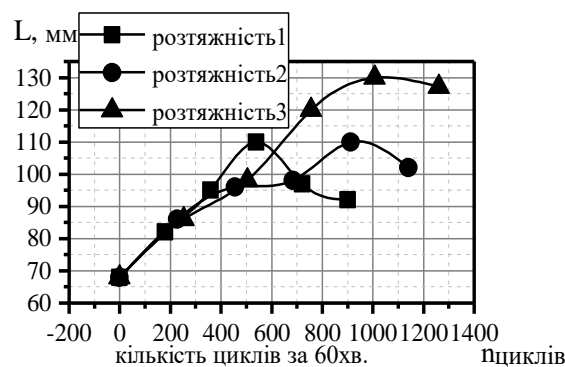


Рис. 3.18. Графіки залежностей розтягування L від числа циклів обробки для: 1 – валка з насічками; 2 – циліндричного валка з пазами; 3 – циліндрично-гвинтового валка

Із даних графічних залежностей ми відзначаємо, що дані геометричні і конструктивні параметри вузла нагнітання впливають на технологічний процес формування напівфабрикату. Для того, щоб не відбулось руйнування структури тіста, при його нагнітанні 1–2 типами валків необхідно в робочій камері вузла нагнітання зменшити кількість тіста та число циклів обробки.

Такий підхід дозволяє додержуватись якісного нагнітання тіста, але не дозволяє збільшити продуктивність машини та провести автоматизацію самого виробництва. В свою чергу, конструкція 3-го типу валків дозволила збільшити продуктивність машини та дає можливість автоматизації лінії.

Проаналізувавши вище наведене видно, що оптимальна пружність тіста при використанні валків істотно залежить від співвідношення заданих величин циклів n, що характеризує собою величину між валками. Дуже слабо залежить від температури навколишнього середовища в діапазоні температур t_0 від 20°C до 35°C.

3.7. Вплив конструктивних параметрів валків на надійність вузла нагнітання тіста при проектуванні

В цілому ряді технологічних процесів формування, до робочих органів висуваються умови що до якісного затягування (захоплення) і нагнітання середовища. Методика проектування таких робочих органів повинна врахувати їх конструктивні особливості та вимоги технологічного процесу. Перспективним є застосування високопродуктивних і надійних поверхонь валків, що дозволять якісно впливати на процес і середовище.

У цей же час розвиток фізико-математичних основ теорії течії середовища, виявлення й вивчення їх ефектів дозволяє не тільки правильно прогнозувати при проектуванні, але й відкриває можливості для створення машин, що працюють за нагнітальним принципом. Тому перспективним напрямком розвитку сучасних технологічних процесів у харчовій промисловості по забезпеченню збільшення випуску харчових продуктів з одночасним підвищенням їхньої якості, є розробка технологій із застосуванням машин з м'якими, деформуєчими, гнучкими робочими органами.

Будь-яка теоретична обґрунтованість нагнітання, розкачування для підтвердження своєї об'єктивності не може відбутись без практичної перевірки. Тому математична модель роботи формувальних машин заснована на приблизному розв'язку рівняння руху в'язкої рідини в камері машини між валками. Це дозволяє обґрунтувати основні показники машини – продуктивність, потужність, конструктивні параметри робочої камери і робочих органів.

Нами встановлено, що не всі конструктивні елементи впливають на показники роботи валкових машин, а лише ті фактори, що приводять до зміни якісних показників, технологічних чи кінематичних. Діючі фактори пов'язані з двома основними вузлами машини: нагнітальний вузол (валкові робочі органи та робоча камера) та формувальний вузол. Необхідно врахувати ще вимоги, котрі ставить промисловість перед сучасним технологічним обладнанням: забезпечити раціональні параметри процесу у робочій камері машини в цілому.

З проведених досліджень встановлено, що незалежними змінними є фактори: температура, швидкість течії тіста в камері, конструкція камери (елементу), матеріал камери, опір тіста, тиск в процесі нагнітання. В якості N плану експерименту вибрано дрібну репліку. План експериментів (табл. 5.4) містить поточні номери загальної кількості N експериментів. Зведені параметри

дають можливість провести регресивний аналіз для отримання лінійної багатофакторної моделі величини продуктивності.

Математична обробка дослідних даних виконувалась з допомогою програми MACHCAD операторними методами найменших квадратів. Після розрахунків коефіцієнтів, рівняння продуктивності має вигляд:

$$Q=1.314t+8.647n+0.78d-4.22P \quad (3.25)$$

Продуктивність перебуває у прямій залежності від часу, частоти обертання робочих валків, товщини зазору між площею їх контактів. Негативний вплив проявляється при стискуванні тіста, який присутній на стадії нагнітання. Величина стискування тіста в прямій залежності від зазору між валками. Тому його значення необхідно виставляти таким чином, щоб зменшити стискування, але при цьому процес нагнітання повинен проходити з якісними характеристиками. Рівняння (3.25) підтверджує висунуті передумови, тобто одержано оптимальну, теоретично обґрунтовану базу експериментальних досліджень. Результати взаємодії факторів, що визначають процес нагнітання тіста з відповідною продуктивністю нових валків має вигляд:

$$Q=2.46t+18.353n-4.706P \quad (3.26)$$

Одержане рівняння (3.26) за допомогою методів планування експериментів, дає можливість встановити (оптимізувати) експлуатаційні параметри машини, шляхом їхнього регулювання. Взаємодія факторів представлена на (рис. 3.15).

Таблиця 3.4

План експериментів формування тіста

ФОРМУВАННЯ	/n	Залежна змінна К	Досліджувані фактори							
			Р, МПа	n ⁻¹ , с	m, кг	°, С°	μ, Па·с	ρ, кг/м ³	δ, мм	N, Вт
ФОРМУВАННЯ		Продуктивність	0,07	0,02	0,080	31	8	1015	0.25	80
		Продуктивність	0,078	10,0	0,120	29	8,2	1015	0.25	85
		Продуктивність	0,09	60.6	0,2	28	9	1020	0.30	80
		Продуктивність	0,072	2	0,085	31	8,1	1010	0.25	85
		Продуктивність	0,09	1,6	0,132	30	8,2	1015	0.30	89
		Продуктивність	0,1	2,0	0,3	32	9,2	1025	0.25	90

Із графіка видно (рис. 3.19), що продуктивність залежить лінійно від стискування тіста валками і часу дії. На перших секундах, коли відбувається зтягування маси тіста в зазор між валками, проходить нелінійна залежність (продуктивність машини практично відсутня). При потраплянні тіста в зазор між валками – різка впадина. Ця впадина свій початок бере після 3 с роботи валків і досягає оптимум після виходу тіста, тобто 35 с. Вже після 5 с нагнітання тіста відбувається зростаюча лінійна залежність взаємозв'язку течії і часу, що визначають плавний ріст продуктивності. Отже, продуктивність машини має лінійну залежність і це впливає на зносостійкість основних вузлів машини, тобто надійність.

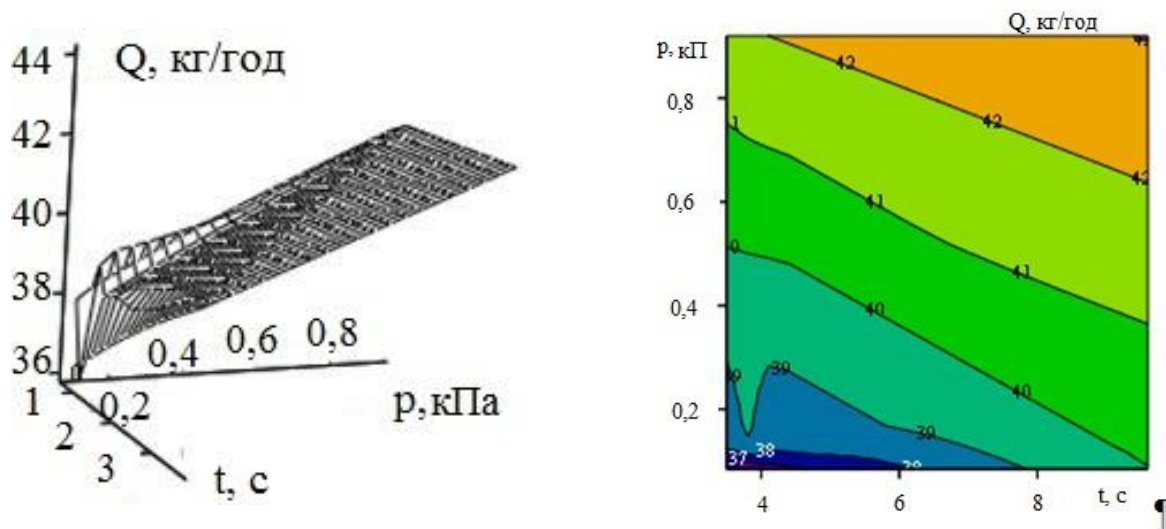


Рис. 3.19. Тривимірний графік залежності продуктивності від стискування і часу процесу

Використання методу експериментально-статистичного моделювання в деякій степені забезпечує рішення проблем прискорення випробувань технічних пристроїв, вузлів на довговічність. Крім цього, значно спрощується перерахунок параметрів технічних конструкцій для умов роботи при різних режимах. Все це дозволяє оперативно здійснювати технічні заходи по підвищенню надійності машини, скоротити час освоєння нових видів продукції, що в свою чергу забезпечує значний економічний ефект.

Одночасно, з вище згаданими рішеннями, необхідно підвищити надійність конструкцій, так як це одне з найважливіших завдань теорії і практики машинобудування.

У дослідженні використано тепловізор (див. розділ 2, частина 1) за допомогою якого через корпус машини визначено нагрівання електродвигуна. Дослідження проводилися для двох конструкцій валків при умовах: температура в цеху відповідала $25,4^{\circ}\text{C}$, двигун $3,2$ кВт з напругою на кожен фазу $U=220$ В, віддаль до поверхні корпусу машини від тепловізора $0,3$ м. З результатів зйомок теплових потоків (рис. 5.20) можна відмітити, що відбулося зменшення навантаження (крутний момент) на електродвигун валками нової конструкції. Встановлено, що навантаження споживаної потужності двигуна становить $2,7$ кВт, а це – зменшить споживання електроенергії на $0,5$ кВт.

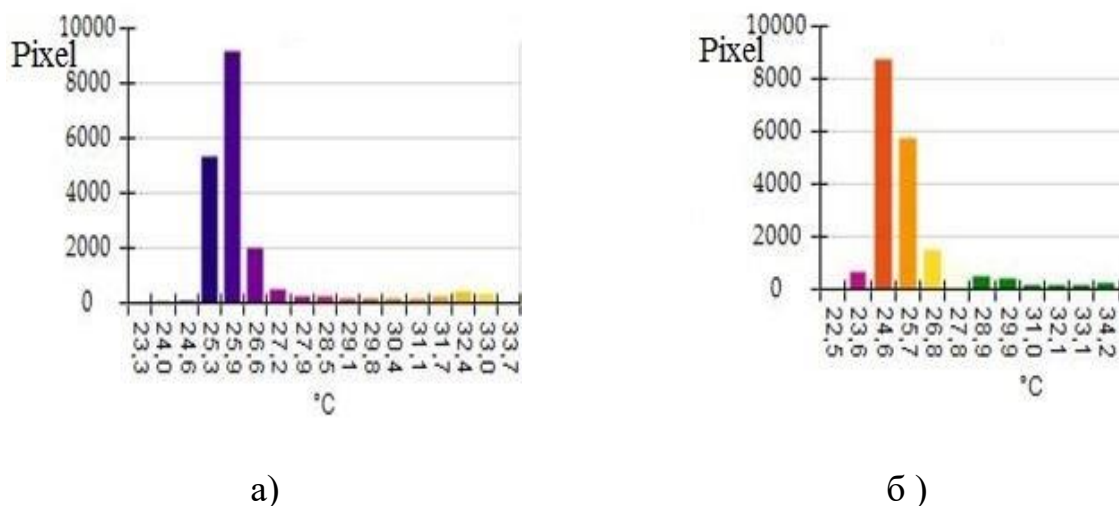


Рис. 3.20. Значення розподілу температури в приводі двигуна машини:
а) валок нової конструкції; б) існуючий валок

Результат по визначенню теплових навантажень на привід двигуна машини показав, що поверхня валка досить відчутно проявляє свій вплив. Різниця середніх температур між валками складає 10,5%. Це дозволяє продовжити термін експлуатації валків при відповідній економії енергоресурсів.

Для встановлення наглядної порівняльної характеристики ефективності нагнітання тіста існуючими і новими валками, проведено дослідження по визначенню органолептичних показників готової продукції (таблиця 3.5). Дані показники ґрунтуються на кінематичних і конструктивних параметрах вузла нагнітання. Вони відіграють важливу роль в експлуатації формувальної машини при забезпеченні надійності проходження технологічного процесу формування бубликів.

Таблиця 3.5

Вплив кінематичних параметрів на якісні показники напівфабрикату і готової продукції

	Показники параметрів		
	Б4-58–68 р. випуску	БМ4-58–2015 р. випуску	БМ4-58У–2017 р. випуску
1	2	3	4
Геометричні параметри валка			
Діаметри валка, мм	160	160	158
Довжина рифля, мм	330	330	470

Продовження таблиці 3.5

	Показники параметрів		
	Б4-58–68 р. випуску	БМ4-58–2015 р. випуску	БМ4-58У–2017 р. випуску
1	2	3	4
Органолептичні показники бублика «Подільського»	20	20	22
Кількість рифлів	25 (з насічками)	25	22
Висота рифля, мм	2	2	4
Частота обертання валка, п/хв	1,2	1,52	1,68
Кінематика обертання валків			
Потужність двигуна, кВт	3,2	2,2	2
Діаметри привідного і веденого шківів, мм	D=410 D=85	D=405 d=105	D=400 d=115
Органолептичні показники бублика «Подільського»			
Зовнішній вигляд: форма	Відповідає формі, наведеній у затвердженій рецептурі, з допустимою зміною діаметра перерізу	Відповідає формі, наведеній у затвердженій рецептурі, з допустимою зміною діаметра перерізу	Відповідає формі, наведеній у затвердженій рецептурі, без зміни діаметра перерізу
поверхня	Присутні тріщини на поверхні які не перевищують допустимих норм(1/3d)	Присутні не значні тріщини на поверхні	Тріщини на поверхні відсутні, або присутні в незначних розмірах
колір	Темно-коричневий, який в певній мірі переходить в світло-коричневий	Світло-коричневий, який в певній мірі переходить в темно-жовтий	Темно-жовтий, без зміни кольору, тобто колір рівномірний по всій поверхні

Закінчення таблиці 3.5

	Показники параметрів		
	Б4-58–68 р. випуску	БМ4-58–2015 р. випуску	БМ4-58У–2017 р. випуску
1	2	3	4
крихкість	Крихкі, при зламі профіль зламу не рівномірний	Крихкі, при зламі профіль зламу не рівномірний	Крихкі, при зламі профіль зламу рівномірний
внутрішній стан	Розрихлена, пропечена структура без слідів непромісу, присутні пори різної дисперсності	Розрихлена, пропечена структура без слідів непромісу, в певній мірі присутні пори більших розмірів	Розрихлена, пропечена структура без слідів непромісу, з рівномірною пористістю
смак і запах	Без стороннього присмаку і аромату	Без стороннього присмаку і аромату	З чисто солодким смаком і приємним ароматом

Концепція забезпечення надійності машин ґрунтується на тому, щоб на стадії проектування створити конструкцію з заданим терміном експлуатації і мінімальними затратами споживача на придбання, обслуговування та ремонт. Реалізація концепції забезпечення надійності і якості технологічного процесу формування, розкачування, ділення, замішування передбачає вирішення ряду стандартних завдань.

Варто відзначити, що однією з основних задач конструювання нових форм валкових робочих органів та самого вузла нагнітання формувальної машини залишається задача оптимізації деформаційних процесів.

Вважаємо, що інтенсифікувати процес нагнітання можливо шляхом забезпечення:

- сталості температур;
- збільшення поверхні теплообміну;
- виготовлення валка з матеріалу, що має максимальну теплопровідність;
- удосконалення теплопровідності через стінку валка і тепловіддачі від стінки валка до внутрішньої пустотілої циліндричної поверхні;

- збільшення теплових втрат у навколишнє середовище (віддача тепла валковою поверхнею, що не контактує з тістом).

Проведені в даному розділі теоретичні та експериментальні дослідження процесу формування тіста валковими робочими органами стали основою і створили напрямок в подальшій розробці вузла.

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, варто організувати дію валків при нагнітанні і розкачуванні так, щоб зберегти високу продуктивність технологічного процесу. Важливо знизити витрати енергії на пластичну деформацію за рахунок вибору оптимального співвідношення між навантаженням, швидкістю деформації і тривалістю навантаження.

Важливим аспектом у роботі валків з тістоподібною масою є адгезійні властивості. Серед компонентів тіста і кондитерської маси найбільшу адсорбцію до матеріалів робочих органів має цукор і жир. Ці компоненти в масі знижують в'язкість. Експериментальні дані показали, що при зменшенні тривалості дії і збільшенні температури валкового робочого органу адгезійні напруження знижуються. Таким чином, при збільшенні температури валків в момент контакту з тістом, поверхневий шар маси в зоні контакту сприяє розплаві жиру і в результаті чого знижується адгезія.

3.8. Обґрунтування робочих параметрів валкових робочих органів для вязкопластичного середовища

Аналіз літературних джерел та виробничого досвіду використання формувальних валкових машин для бубликів показав, що існуючі

конструкції або складні, або не забезпечують прийняттого рівня стискування та подачі середовища. Відсутність науково-обґрунтованих методик розрахунку конструктивних параметрів з урахуванням факторів, які можуть впливати на ефективність роботи, обмежує можливості підвищення дії валків, що створюються. Тому, враховуючи розглянуті в попередніх розлідах матеріали, дали нам можливість узагальнити вплив робочих параметрів на тісто через об'ємний ККД.

У попередніх дослідженнях [8, 14, 31] зроблений вагомий внесок для розкриття механізму визначення об'ємного ККД при дії валків. Цей механізм і методика розрахунку охоплюють не всі види втрат при дії валків та здебільшого можливі тільки для вже існуючих конструкції, а не для тих, які знаходяться на стадії проектування.

Тому для визначення основних напрямів забезпечення вимог ефективної роботи валкових робочих органів необхідно забезпечити зменшення пульсації подачі, поліпшення затягувальної здатності, зниження рівня незворотних втрат, зменшення металоємності, поліпшення ремонтпридатності та надійності конструкції.

У машинах з валками подача середовища до нагнітального зазору здійснюється як у такті затягування, так і в такті нагнітання. Це справедливо лише для теоретичного випадку, коли об'ємний ККД валкової машини дорівнює одиниці. У дійсності об'ємний ККД різних конструкцій валків з урахуванням переміщення середовища різної рухомості може коливатися в широких межах – від 0,4 до 0,9. Тому для забезпечення рівномірності подачі середовища в тактах необхідно враховувати значення ККД при проектуванні діаметрів валків, конструкції робочої камери та бункера для середовища.

Валки, що приводяться в дію від електромеханічного привода, до складу якого входить кривошипно-шатунний механізм, мають суттєвий недолік, а саме: оскільки закон руху такого механізму є близьким до синусоїдального, то поблизу від «мертвих» точок швидкість руху робочого органа дуже незначна, що в результаті призводить до виникнення помітної пульсації, яка зумовлена різницею у величинах подачі впродовж такту та поблизу від «мертвих» точок.

Для запобігання даному явищу в роботі машини можна запропонувати нову конструкцію валків, що регулює течію тіста за допомогою своєї поверхні в межах циклу ходу кривошипно-шатунного механізму. Високий ККД регулятора, порівняно невисока вартість та можливість збереження обертового моменту дозволяє суттєво полегшити вирішення недоліків і, як наслідок, зміни продуктивності. Крім того, можливою є зміна частоти обертання електродвигуна

для наближення до постійної швидкості руху під час робочого циклу подачі тіста, шляхом прискорення частоти його обертання.

Запропоновані конструкції валкових робочих органів, ніби є компенсатором пульсації тиску, що найбільш повно відповідає висунутим вимогам (див. розділ 6).

Удосконалені конструкції валків спрямовані так, щоб під час затягування маси тіста валками в робочій камері створювалося часткове розрідження. Тісто за сприянням різної геометрії пазів на поверхні валків одержує деформаційний рух. Цей рух впливає на течію маси тіста до міжвалкового зазору. При цьому одна частина тіста, котра надійшла до зазору, йде на його стискання, а друга частина залишається частково стисненою на поверхні валків і витискується в камеру формувального пристрою.

На основі цих циклічних дій розглянемо та обґрунтуємо закономірності, які враховують види втрат, що виникають у процесі роботи валків, та дозволяють кількісно оцінити величину об'ємного ККД ще на етапі проектування

$$\eta_{об} = \frac{Q_d}{Q_t} \cdot 100, \%$$

де $\eta_{об}$ – об'ємний ККД;

Q_d – дійсна валкова подача тіста, м³/с;

Q_t – теоретична подача, м³/с.

Дійсна подача тіста валками за цикл роботи (один оберт кривошипа) менша від теоретичної на величину незворотних втрат тіста, що складаються внаслідок розширення під дією часткового розрідження (адгезії також), м³; втрати через стиснення тіста на ділянці міжвалкового зазору робочій камері під дією надлишкового тиску подачі, м³; зворотні витрати тіста на початку такту нагнітання, м³.

Розрахунок перших двох складових, очевидний і, полягає в добутку величини максимального та мінімального об'єму робочої камери на відповідні коефіцієнти розширення ε_r і стиснення $\varepsilon_{стисн}$ тіста. Тому третя складова q_3 визначається із врахуванням значенням величини φ_3

$$q_3 = v_0 \int_0^{\varphi_3} \left(r \cdot \sin(\phi) - \frac{r^2 \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\phi)}{\sqrt{l^2 - r^2 \cdot \sin(\phi)^2}} \right) + V_B,$$

де r – радіус валка, м;

φ_3 – кут повороту валка, якому відповідає момент затягування, рад.

Кут (φ_k) показує, в якому напрямі буде рухатися маса тіста в момент дії валків. Встановлено, що чим менша висота робочої камери, що, у свою чергу, забезпечує мінімальний «шкідливий» об'єм, тим більший цей кут. Велике значення кута найбільшого тиску призводить до погіршення спрацювання поверхні валків та може призвести до «зависання» тіста при зміні його структурно-хімічних властивостей, тобто до зниженої рухомості.

Відношення подачі маси тіста в дискретних циклах вузла нагнітання формувальної машини можна подати через коефіцієнт корисної дії. Даний коефіцієнт дозволить встановити ефективність роботи вузла на основі конструктивних та технологічних параметрів процесу. Тому його значення можна встановити як відношення маси тіста в зазорі між валками до маси його розкачаного після валків, що поступило на формувальний пристрій машини. Він описується залежністю:

$$K = \frac{g_{зат}}{g_{наг}} = \frac{(R_2^2 - R_1^2) \cdot (1 - \frac{V}{V_0})}{R_2^2 - (R_2^2 - R_1^2) \cdot (1 - \frac{V}{V_0})}$$

де $q_{зат}, q_{нагн}$ – подача маси тіста до зазору відповідно в такті затягування та нагнітання, м³;

R_2 – радіус тіста по валку, м;

R_1 – радіус валка, м;

V_0 – об'єм тіста в робочій камері, м³;

V – об'єм витоків при завершенні циклу агнітання, м³.

Отже, для нормальної роботи нових валків з різною геометрією поверхонь при пульсації тиску, важливу роль відіграє заповнення робочої камери, що гідравлічно пов'язана з робочим бункером та достатньою кількістю робочого тіста. У випадку, якщо втрати робочого тіста з ділянки затягування відбулися через спрацювання ослаблення його щільності, то валки деяку частину шляху, залежно від кількості втрат робочого тіста, не будуть створювати робочого

тиску, а рухатимуться вхолосту, компенсуючи розрідження, що викликає дисбаланс у порціях подачі тіста в зазор у тактах затягування та нагнітання. Через це збільшиться пульсація ослабленої подачі тіста на стискування.

Розрахункова залежність для валкових машин має вигляд:

$$d_B = \frac{v_0 \sqrt{-2 \cdot \eta_{\text{всм}} (-2 \cdot \eta_{\text{всм}} + \eta_{\text{нагн}})}}{2 \cdot \eta_{\text{всм}}},$$

де d_B – діаметр валка, м;

v_0 – швидкість маси середовища, м/с;

$\eta_{\text{всм}}$ – об’ємний ККД у такті затягування;

$\eta_{\text{нагн}}$ – об’ємний ККД у такті нагнітання.

Для можливості прогнозування ефективності роботи валків та визначення впливу діючих на нього факторів був проведений трифакторний аналіз другого порядку [20, 25] експериментально одержаних значень об’ємного ККД $\eta_{\text{об}}$. При цьому встановлена така функціональна залежність:

$$\eta_{\text{об}} = 0,81388 + 0,08450 \cdot \varepsilon_{\text{рух}} - 0,02460 \cdot n - 0,04760 \cdot h_{\text{max}} - 0,02295 \cdot \varepsilon_{\text{рух}}^2 - 0,00445 \cdot n^2 - 0,00245 \cdot h_{\text{max}}^2 + 0,01400 \cdot \varepsilon_{\text{рух}} h_{\text{max}},$$

де $\eta_{\text{об}}$ – об’ємний ККД а;

$\varepsilon_{\text{рух}}$ – рухомість середовища, см;

n – частота обертання, об/хв;

h_{max} – максимальний зазор між валками, м.

Одержані результати показують, що об’ємний ККД валків значною мірою залежить від рухомості середовища та максимального зазору і меншою мірою від частоти обертання куліси.

Висновки. Оптимізація технологічних режимів стискування при нагнітанні тіста валками є важливим фактором, що забезпечує техніко-економічні показники процесу в цілому. При цьому, значення оптимальних технологічних режимів нагнітання, стискування і відповідних енергосилових параметрів процесу є необхідними для удосконалення наукової бази даних при проектно-конструкторських рішеннях.

Розглянуті різні конструктивні особливості валків по забезпеченню нагнітання, транспортування, розкочування та змішування. Встановлено, що режими роботи і різні фізико-механічні властивості рецептурних компонентів на стадіях їх початкової дії і дальшого стискання середовища вимагає застосування різних валкових робочих органів та критеріїв оцінки процесу на цих стадіях.

Розглянуто проблеми конструювання і виготовлення валкових машин, особливо мобільних, на сучасному рівні пов'язана з оптимізацією їх елементів за матеріаломісткістю, геометрією. Визначена фізична суть нагнітання тіста валками та фізико-технологічні закономірності впливу валкових робочих органів на нього, оптимальні параметри валкового нагнітання та геометричні параметри валка, які лежать в межах: діаметр валків 155...165 мм; зазор між ними 15...34 мм.

Розроблена аналітична модель руху тіста при дії кута захвату валків, яка дала можливість встановити, що значення радіуса валка при однаковій кутовій швидкості тіста з різними кутами взаємодії φ_k , визначає відповідний час його руху. На основі експериментальних досліджень встановлено основні напрямки вибору ефективної форми валкових робочих органів.

Наведено методику розрахунку оптимальних параметрів валкового розкочування. Математична модель дозволяє визначати стискуваність тіста на початкових і кінцевих значеннях в'язкості при додержанні заданих технологічних і конструктивних параметрах (температура, рецептура, форма поверхні валка). Наведений аналіз дає можливість бути основою для розробки інженерної методики проектування робочих органів по регулюванню стабільності процесу.

Визначено криву швидкості течії тіста, де відзначено два параметри, що описують структурно-механічні властивості. Так, починаючи з швидкості 1,3 рад/с і напруження зсуву 1,02 кПа, відбувається початок зміни параметрів. Починаючи з швидкості 1,7 і напруження зсуву 3,92, течія тіста одержує пряму лінію, яка описує переміщення тіста між валками на ділянці нагнітання. Отримані результати дають можливість проводити розрахунки для визначення швидкості руху тіста при стисканні.

Наведено методику визначення оптимальних параметрів валкового нагнітання.

Проаналізовано та встановлено оптимальну пружність тіста при дії валків. Відзначено, що вона істотно залежить від співвідношення заданих величин циклів n , що характеризує собою величину між валками. Дуже слабо залежить

від температури навколишнього середовища в діапазоні температур t_0 від 20°C до 35°C.

Визначено та обґрунтовано вплив конструктивних параметрів валків на надійність вузла нагнітання тіста при проектуванні.

Список використаної літератури

1. Федоткин И. М., Гулый И. С. Математическое моделирование. Теория технологических процессов и их интенсификации. К. : Арктур-А, 1998. 416 с.
2. Стадник І. Я. Вплив конструкції місильного органу на інтенсифікацію замішування. Хлібопекарна і кондитерська промисловість України. 2006. № 9.
3. Юдаев В. Ф. Гидромеханические процессы в роторных аппаратах с модуляцией проходного сечения потока обрабатываемой среды / Теор. Основы хим. Технл. 1994. Т. 28, № 6. С. 581–590.
4. Арет В. А., Мачихин Ю. А. Формование конфетных масс выдавливанием. М. : МТИПП, 1969. 35 с.
5. Андреев А. Н. Выбор реологической модели пресного слоеного теста. Проблемы оборудования в торговле и общественном питании: внутривуз. СПб. научн. тр. Л. : ЛИСТ, 1976, Вып. 58. С. 5–8.
6. Зайцев А. В., Пеленко Ф. В. Моделирование течения вязкой жидкости в трубе. Санкт-Петербург: СПбГУНиПТ, 2012.
7. Стадник І. Я. Науково-технічні основи процесів та розробка обладнання для безлопатевого замішування тіста. Автореферат док.тех. наук. Київ., 2013. 42 с.
8. 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.
9. 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.
10. Арет В. А., Мачихин Ю. А. Формование конфетных масс выдавливанием. М. : МТИПП, 1969. 35 с.
11. Pawel D., Derkach A., Stadnyk I., Vitenko T. 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.

12. Stadnyk L., Novak L. Matenchuk Global rheological approach to the quality of medium injected by the rollers. *Potravinarstvo Slovak Journal for Food Sciences*, 2018, Vol.1. P. 1–8.
13. Гаврилко П., Деркач А., Стадник І. Стадник Обґрунтування параметрів, що відбуваються в робочих камерах машин з валковими робочими органами. *Хранение и переработка зерна*. 2017№ 2 (210). Том 2. С. 34–38.
14. Комиссаров С. С. Исследование процесса измельчения мясного сырья в волчках и разработка ножевых головок: дис. канд. тех. наук: 05.18.12. М., 2003. 159 с.
15. Сухенко В. Ю., Дзюб А., Мануилов В. Методика исследования процессов коррозионно-механического изнашивания оборудования пищевых и перерабатывающих производств / *Polish Academy of Sciences/-Lublin-Rzeszow; AgroMedia*, 2014. Vol. 16, № 3. С. 74–81.
16. Виноградов И. Э. Физические методы исследования противозадирных присадок к маслам. Методы оценки противозадирных и противозадирных противоизносных свойств смазочных материалов. М. : Наука, 1969, С. 21–24.
17. Крагельский И. В. Некоторые задачи науки о трении. В об. «Проблемы тения и изнашивания», К. : «Техныка», 1981. Вып. 1. С. 11–17.
18. Деркач А. П., Стадник І. Я., Василів В. П. застосування експериментально-статистичного моделювання для дослідження параметрів надійності валкових машин / *Научный взгляд в будущее. ISSUE № 2*, 2016. С. 63–66.
19. Рябченков А. В. Коррозионно-усталостная прочность стали. М. : Машгиз. 1953. 215 с.
20. Балтер М. А. Упрочнение деталей машин: 2-е узд. перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1988. 184 с.
21. Ребиндер П. А., Елифанов Г. И. Влияние поверхностно-активной среды на граничное течение и знос в кн.. Развитие теории трения и изнашивания. М. : АН СССР, 1957, С. 47–56.
22. Фрумкин А. Н. Потенциалы нулевого заряда. М. : Наука, 1982. 259 с.
23. Гуськов К. П., Мачихин Ю. А., Мачихин С. А., Лунин Л. Н. Реология пищевых масс. М. : Пищевая промышленность, 1970. 207 с.
24. Сухенко В. Ю. Науково-технічні основи мясоподрібнювальних процесів переобки підприємств АПК: Дис. док.техн. каук: 05.18.12. К., 2015. С. 584.

25. Мачихин Ю. А., Мачихин С. А. Инженерная реология пищевых материалов. М. : Легкая и пищевая пром.-сть, 1991. 216 с.
26. Карпенко Г. В. Влияние среды на почность и долговечность металлов: Монография. К. : Наукова думка, 1986. 126 с.
27. Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача. М. : Высшая школа, 1980. 469 с.
28. Справочник специалиста пищевых производств. Книга 2. Теплофизические процессы. Энергосбережение / А. И. Соколенко, А. И. Украинец, В. Л. Яровой и др.; под ред. А. И. Соколенко. К. : АртЭк, 2003. 432 с.
29. Новицкий А. Е. повышение долговечности деталей оборудования молочной промышленности, подверженным коррозионно-механическому изнашиванию: дис. кан. техн. наук: 050214. К., 1984. С. 244.
30. Арет В. А., Николаев Б. Л., Забровский Г. П., Николаев Л. К. Реологические основы расчета оборудования производства жиросодержащих пищевых продуктов. СПб. : СПбГУНиПТ, 2006. 435 с.
31. Касадрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. М. : Наука, 1970. 104 с.
32. Федоткин И. М., Гулый И. С. Математическое моделирование. Теория технологических процессов и их интенсификации. К. : Арктур-А, 1998. 416 с.
33. Лисовенко А. Т. Технологическое оборудование хлебозаводов и пути его совершенствования. М. : Легкая и пищевая промышленность, 1982. 208 с.
34. Стадник І. Я., Луців М. М. Моделювання руху змішуваних компонентів у камері безлопатевої тістомісильної машини / Хранение и переработка зерна. 2011. № 2. С. 58–60.
35. Кафаров В. В., Дорохов И. Н. Системный анализ процессов химической технологи. Основы стратегии. М. : Наука, 1976. 300 с.
36. Стадник І. Я., Олійник В. М. Процес замішування на безлопатевій тістомісильній машині можна регулювати / Хлібопекарна і кондитерська промисловість України. 2011. № 5. С. 5–7.

РОЗДІЛ 4

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКИ МІЖ КОНСТРУКТИВНИМИ, ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТА ТЕРМОДИНАМІКОЮ СЕРЕДОВИЩ ВУЗЛА НАГНІТАННЯ

4.1. Опис матеріальних потоків тіста при нагнітанні

Одним із шляхів зменшення собівартості продукції є оптимізація апаратурної реалізації виробництв з енергетичної точки зору, тобто забезпечення повної відповідності режимів обробки з дотриманням структурно-механічних властивостей в'язкого тіста. Вартим уваги може бути той факт, що у більшості випадків в дослідженнях не враховувались втрати енергії фізико-хімічних зв'язків при визначенні оптимальних параметрів процесу. У більшості досліджень доцільність вибору певних технологічних параметрів оцінюється з точки зору збільшення виходу кінцевого продукту, а комплексне порівняння різних технологічних схем з енергетичної точки зору проведено не було. Це спрямувало напрям наших досліджень у встановленні взаємозв'язків конструктивних форм і параметрів валкових робочих органів.

До основних взаємозв'язків, які необхідно розглянути, віднесено наступне:

- аналіз теплофізичних процесів при дії обертових валків на тісто;
- оцінка енергетичних ресурсів і розробка пропозицій щодо їх зменшення;
- удосконалення апаратурного виконання технологій пов'язаних з суміщенням в часі процесів: 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 тіста 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. Більш детально ці закономірності розглянемо в даному розділі монографії.

Аналіз існуючих методів [1, 2] розрахунку машин з валковими робочими органами, а саме визначення коефіцієнта подачі, конструктивних параметрів, споживаної потужності та впливу реології на течію маси тіста між валками, свідчить 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. Проведений аналіз дослідження (розділ 2) показав, 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 присвячена розробленню узагальненої моделі робочого процесу дії валків на тісто. Вона спрямована на отримання конструктивних, витратних та енергетичних характеристик й визначення шляхів підвищення ефективності роботи такого класу машин у деформаційних режимах.

4.1.1. Визначення характеристик тіста при деформації

Наведені попередньо матеріали зорієнтовані у більшості на термодинамічні перетворення і стосуються тіста з подальшими деформаційними впливами на нього. Наші початкові умови тіста характеризуються значеннями $24,2 \pm 2^\circ\text{C}$, а за умов формування – $30 \pm 2^\circ\text{C}$. Важливе значення має ретельність обминання тіста при формуванні. З нього частково, як було описано, виділяється діоксид вуглецю та інші продукти бродіння. При цьому покращуються умови життєдіяльності дріжджів, підвищується їх бродильна активність, еластичність тіста. Останні впливають на формостійкість заготовок бутика при транспортуванні, температурній обробці у обшпарювальній ванні й випіканні. Всі технологічні операції визначають об'ємний вихід виробів і якість структури м'якушки [3, 4].

Як відзначалося раніше (розділ 2), тісто за своїми властивостями відповідає пружності твердого тіла і, одночасно, рідині за ознакою текучості (розпливання). Співвідношення цих властивостей визначається складом і станом борошна – крохмалю, білків, клітковини, які гідратуються у присутності води з

утворенням колоїдної системи, а також вмістом низькомолекулярних сполук цукрів, жирів, амінокислот тощо [3, 7].

Дослідження з використанням альвеографа встановили, що додаткова обробка тіста розкачувальними валками перед його завантаженням у робочу камеру та сама дія валкового вузла впливає на деформацію диспергованої фази. При дії змінних тисків (стискання середовища) покращується пружність та еластичність тіста, збільшуються витрати питомої енергії на його деформацію. Відповідно змінюються його структурно-механічні властивості, які залежать від числа циклів нагнітання.

Величини розтяжності і пружності перебувають в прямій залежності від контакту тіста, товщини й площі контакту валкового робочого органу, кількості циклів за період нагнітання маси тіста з робочої камери. Дослідженнями підтверджено висунуті передумови й оптимальну, теоретично обґрунтовану залежність впливу деформації на якість тіста. Результати взаємодії факторів, що визначають структурно-механічні властивості маси тіста під час його нагнітання на протязі усього дискретного циклу, представлені в таблицях 6.1–6.3.

Таблиці 4.1 і 4.2, в яких представлені результати дослідження циліндричного валка з насічками та з прямими пазами, свідчать про зміну властивостей тіста з плином часу, тобто в сторону зменшення, після збільшення дискретності дії валків.

Результати досліджень по визначенню розтяжності і пружності тіста при нагнітанні циліндрично-гвинтовими валками, представлені в таблиці 4.3, мають плавний характер своєї зміни.

Таблиця 4.1

Для зношених валків з прямими пазами з насічками

Число циклів обробки	Пружність, Р, мм	Розтяжність, L, мм	P/ L	Питома робота деформації, $W \cdot 10^4$, Дж
Контроль (без обробки)	85	68	1,25	238,06
$n_{\text{цикл}} = 180$	105	82	1,28	316,54
$n_{\text{цикл}} = 360$	120	95	1,26	434,3
$n_{\text{цикл}} = 540$	125	110	1,14	545,4
$n_{\text{цикл}} = 720$	115	97	1,185	616,1
$n_{\text{цикл}} = 900$	105	92	1,141	692,3

Таблиця 4.2

**Пружно-еластичні властивості тіста з додатковою механічною
обробкою для нових валків з прямими пазами**

Число циклів обробки	Пружність, Р, мм	Розтяжність, L, мм	P/ L	Питома робота деформації, $W \cdot 10^4$, Дж
Контроль (без обробки)	85	68	1,25	238,06
$n_{\text{цикл}} = 228$	105	86	1,22	316,54
$n_{\text{цикл}} = 456$	120	96	1,25	238,06
$n_{\text{цикл}} = 684$	130	98	1,32	197,6
$n_{\text{цикл}} = 912$	125	110	1,136	589,42
$n_{\text{цикл}} = 1140$	115	102	1,127	763,07

Таблиця 4.3

**Пружно-еластичні властивості тіста з додатковою механічною
обробкою для циліндрично-гвинтових валків**

Число циклів обробки	Пружність, Р, мм	Розтяжність, L, мм	P/ L	Питома робота деформації, $W \cdot 10^4$, Дж
Контроль (без обробки)	85	68	1,25	238,06
$n_{\text{цикл}} = 252$	105	86	1,22	316,54
$n_{\text{цикл}} = 504$	117	98	1,19	654,2
$n_{\text{цикл}} = 756$	130	120	1,08	836,5
$n_{\text{цикл}} = 1008$	145	130	1,115	764,3
$n_{\text{цикл}} = 1260$	142	127	1,118	752,9

Порівняльні характеристики результатів взаємодії факторів, що визначають структурно-механічні властивості маси тіста під час його нагнітання на протязі усього дискретного циклу, представлені на рис. 4.1 і 4.2.

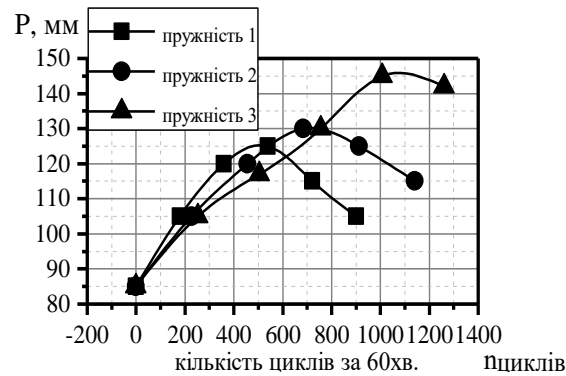


Рис. 4.1. Графіки залежностей пружності P від числа циклів обробки тіста: 1 – циліндричні валки з пазами і насічками; 2 – циліндрична валка з пазами; 3 – циліндрично-гвинтові валки

Із рис. 4.1 і 4.2 видно, що геометричні і конструктивні параметри валка впливають на пружні властивості і розтягування тіста. Так, при завантаженій робочій камері тістом масою 40кг на циліндричних валках з пазами і насічками спостерігаються найкращі показники до 540-го циклу і тривалості 35 хв. Після тривалості 35 хв, відбувається структурна зміна тіста, а відповідно змінюються і структурно-механічні властивості. При роботі циліндричних валків з пазами, уже після 30 хв й 584-го циклу деформації відбувається зміна структури. В свою чергу, при нагнітанні тіста циліндрично-гвинтовими валками, структурно-механічні властивості тіста залишаються не змінними до 50 хв й 1008 циклу обробки. Тільки після даного часу починаються відбуватися в незначній мірі зміни. Це пояснюється тим, що деформація тіста, при роботі нової конструкції валків не зазнає температурних впливів, тобто відсутній негативний вплив – тертя.

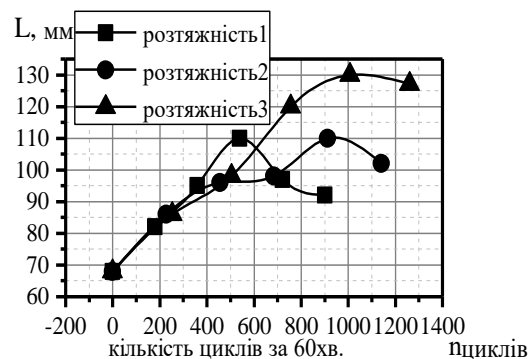


Рис. 4.2. Графіки залежностей розтягнутості L від числа циклів обробки тіста для: 1 – циліндричні валки з пазами і насічками; 2 – циліндричні валки з пазами; 3 – циліндрично-гвинтові валки

Дані графічних залежностей свідчать про те, що дані геометричні і конструктивні параметри вузла нагнітання впливають на технологічний процес формування напівфабрикату. Для того, щоб не відбулось руйнування структури тіста при його нагнітанні у циліндричних валках з пазами і насічками та циліндричних валках з пазами необхідно в робочій камері вузла нагнітання зменшити кількість тіста та число циклів обробки.

Такий підхід забезпечує якісне нагнітання тіста, але не дозволяє збільшити продуктивність машини та провести автоматизацію самого виробництва. У свою чергу конструкція циліндрично-гвинтових валків дозволила збільшити продуктивність машини та дає можливість автоматизації лінії.

Отже, оптимальна пружність тіста при використанні валків істотно залежить від співвідношення заданих величин циклів n , яке дуже слабо залежить від температури навколишнього середовища.

4.2. Основні теоретичні положення процесу теплообміну

При тепловіддачі (конвективному теплообміні) тепло розповсюджується від поверхні твердого тіла до рідини крізь граничний шар за рахунок теплопровідності, а від граничного шару в масу рідини – переважно конвекцією. Тому для описання процесу тепловіддачі спочатку отримують диференціальне рівняння теплопровідності.

Це рівняння виводять на основі закону збереження енергії, при цьому допускають, що тепло розповсюджується в середовищі, яке має густину ρ , теплоємність c , теплопровідність λ . Причому, ці параметри сталі за напрямками y у часі.

Диференціальне рівняння теплопровідності Фур'є, яке описує зміну температури у часі для нерухомого елемента:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \underbrace{\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)} \quad (4.1)$$

де $\nabla^2 t$ – оператор Лапласа.

$$\frac{\lambda}{c\rho} = a \quad (4.2)$$

a – коефіцієнт температуропровідності, m^2/s .

Таким чином, (1) і (2) можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t \quad (4.3)$$

При конвективному теплообміні температура елементу змінюється як у часі, так і у просторі. У таких випадках зміну величини виражають за допомогою субстаціональної похідної. Позначивши проєкції вектору швидкості на відповідні осі ω_x , ω_y , ω_z , запишемо рівняння для субстаціональної похідної:

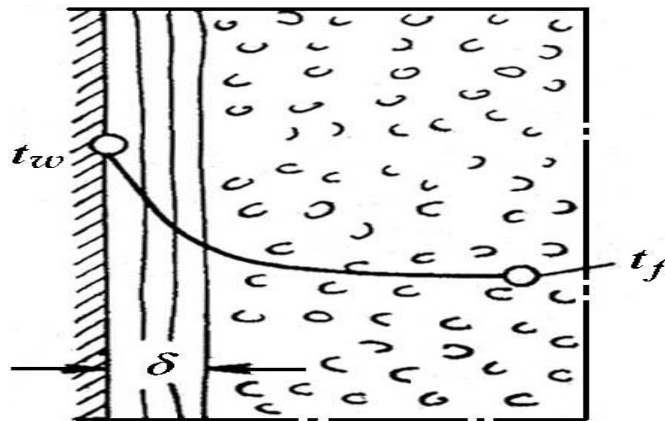


Рис. 4.3. Будова шару тіста, що примикає до поверхні стінки валка
 I – локальна зміна температури; II – конвективна зміна температури.

$$\frac{Dt}{d\tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} + \underbrace{\frac{\partial t}{\partial x} \omega_x + \frac{\partial t}{\partial y} \omega_y + \frac{\partial t}{\partial z} \omega_z}_{\Psi} \quad (4.4)$$

Якщо в рівнянні теплопровідності (4.1) замінити локальну зміну температури на повну, то отримаємо диференціальне рівняння конвективного перенесення тепла Фур'є-Кірхгофа:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial x} \omega_x + \frac{\partial t}{\partial y} \omega_y + \frac{\partial t}{\partial z} \omega_z = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (4.5)$$

Дане рівняння – математично описує процес розповсюдження тепла в середовищі, яке рухається, одночасно теплопровідністю й конвекцією. Для

повного математичного описання конвективного теплообміну це рівняння повинне бути доповнене рівнянням, яке характеризує умови на границі поділу фаз середовища.

Біля поверхні твердого тіла завжди є граничний шар товщиною δ , крізь який тепло розповсюджується теплопровідністю. Ця кількість тепла визначається законом Фур'є:

$$dQ = -\lambda \frac{dt}{dn} dF d\tau \quad (4.6)$$

Цю ж кількість тепла можна знайти за законом Ньютона:

$$dQ = \alpha(t_w - t_f) dF d\tau \quad (4.7)$$

Тобто,

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha(t_w - t_f) \quad (4.8)$$

Рівняння (4.5) і (4.8) повністю описують конвективний теплообмін і є математичною моделлю процесу тепловіддачі.

У випадках, коли теплообмін відбувається в результаті природної конвекції, яка обумовлена різницею густин рідини в різних точках системи, процес характеризується значенням критерію Архімеда:

$$Ar = \frac{gl^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \quad (4.9)$$

де ρ_1 і ρ_2 – густини холодної і нагрітої рідини.

У теплових процесах різниця густин у різних точках обумовлена різницею температур нагрітої і холодної рідини, тому відношення $\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1}$ в критерії Архімеда замінюють добутком $\beta \Delta t$ і отримують критерій Грасгоффа:

$$Gr = \beta \frac{g l^3}{\nu^2} \Delta t = \beta \Delta t Ga \quad (4.10)$$

де β – температурний коефіцієнт об’ємного розширення рідини;
 Ga – критерій Галілея.

Gr характеризує гідродинамічний режим потоку рідини в умовах природної конвекції, яка відбувається під впливом різниці густин нагрітої і холодної поверхонь.

Отримані критерії подібності дозволяють знайти критеріальне рівняння конвективного перенесення тепла:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr, Fo) \quad (4.11)$$

Це рівняння спрощується, якщо розглядається процес в конкретних умовах – при стаціонарних процесах виключається Fo , при примусовому русі – Gr , при вільному русі – Re . Наприклад, для стаціонарного примусового руху критеріальне рівняння можна записати у вигляді:

$$Nu = A Re^m Pr^n \quad (4.12)$$

Рівняння (4.12) з коефіцієнтами і показниками ступенів для кожного конкретного випадку теплообміну наведені у довідниках.

4.2.1. Отримання математичної моделі і критеріального рівняння процесу тепловіддачі

Процес нестационарної теплопровідності описується диференціальним рівнянням

$$\frac{dt}{d\tau} = a \left(\frac{d^2t}{dx^2} + \frac{d^2t}{dy^2} + \frac{d^2t}{dz^2} \right) \quad (4.13)$$

Рішення даного рівняння дозволяє отримати закон зміни температури в період часу t (τ) для будь-якої точки тіла, що розглядається із координатами x, y, Z .

Теплопровідності λ , об’ємна теплоємності c_p (c – масова теплоємність, ρ – густина) і температуропровідність a для харчових продуктів є теплофізичними характеристиками (ТФХ) так, як залежать не тільки від параметрів стану, але і

від умов теплообмінного процесу – густини теплового потоку, швидкості зміни температури і т. д.

Перенесення теплоти теплопровідністю у вологих колоїдно-капілярно-пористих матеріалах супроводжується вологоперенесенням, конвекцією, випромінюванням в порах. Тому ТФХ враховують вклад цих механізмів перенесення і називають ефективними ТФК.

Перенесення теплоти теплопровідністю супроводжується перенесенням енергії за рахунок масо перенесення по А. В. Ликову:

$$g = -\lambda \text{grad} \cdot t + \sum_i^n i_k j_k \quad (4.14)$$

де g – густина теплового потоку поверхнями Вт/м²;

i_k – ентальпія води або пари, Дж/кг перенесених при наявності градієнта температури $-\text{grad} t$ з інтенсивністю j_k (кг/м²с).

Розв’язок рівняння (4.14) від одиниці до n враховує різні переміщення води або пари (вологопровідністю, термовологопровідністю і т. д.). Тому визначаючи λ , як g ($\text{grad} t$), одержуємо ефективне значення λ .

Об’ємна теплоємність $c\rho$ для хлібобулочної продукції часто включає в себе теплоту фазових перетворень вологи, коагуляцію білків, клейстеризацію крохмалу і інших процесів:

$$c\rho = (c\rho)_e + \sum_1^m (c\rho)_d$$

де $(c\rho)_e$ – власна теплоємність тіста, Дж/(м³К);

m – число додаткових теплових ефектів;

$(c\rho)_d$ – додаткова теплоємність за рахунок фазових та інших перетворень.

Для аналітичного вирішення (інтегрування) рівняння (4.1) необхідно прийняти граничні умовами: початкове розподілення температури-початкові умови; закон дії на поверхню тіла навколишнього середовища- граничні умови.

Граничні умови різного роду задають різними способами:

1 рід – задана температура поверхні тіла t_n ;

2 рід – задана густина теплового потоку на поверхні тіла, g_n ;

3 рід – задана температура навколишнього середовища t_{cp} і коефіцієнт тепловіддачі α конвекції між тілом і середовищем;

4 рід – задана температура або тепловий потік на поверхні дотику тіл.

Для необмеженої пластини товщиною $2/\delta$, нагрітою тепловим потоком постійної густини g_n , рівняння (6.1) спрощується:

$$\frac{dt}{d\tau} = a \frac{d^2t}{dx^2} \quad (4.15)$$

Початкові умови: $t(x,0)=t=const$. Граничні умови 2 роду: $\frac{\partial t(\delta,\tau)}{\partial x} = -\frac{g_n(t)}{\lambda}$;

$$\frac{\partial t(0,\tau)}{\partial x} = 0 \quad (4.16)$$

Результат рішення рівняння (6.16) дає змогу визначити поле температур $t(x,y)$ поле теплового потоку $g(x,y)$ в пластині для любого часу процесу:

$$t(x,\tau) = t_0 + \frac{g_n}{\lambda} \left(\frac{a\tau}{\delta} - \frac{\delta^2 - 3x}{6\delta} + \delta \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{\lambda_n^2} \cos \mu_n \frac{x}{\delta} e^{-\mu_n^2 F_0} \right) \quad (4.17)$$

$$g(x,\tau) = g \left(\frac{x}{\delta} - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu} \sin \mu_n \frac{x}{\delta} e^{-\mu_n^2 F_0} \right) \quad (4.18)$$

де характеристичні числа $\mu=n\pi$ і число Фур'є (безрозмірний час процесу) $F_0=a\tau/\delta^2$.

Починаючи з деякого часу, що характеризується деяким великим значенням F_0 , суми рядів у рівнянні (4.17) стають досить малими. Це відбувається із-за того, що $grad t$, теплопровідності перестав залежати від початкового розподілу температур і настає стала температура 2 роду, тобто у шару тіла встановлюється лінійний розподіл густини теплового потоку і параболічний розподіл температури. При цьому швидкість зміни температури $dt/d\tau=u$ в усіх точках тіста однакова.

$$t(x, \tau) = t_0 + \frac{g_n}{\lambda} \left(\frac{a\tau}{\delta} - \frac{\delta^2 - 3x^2}{6\delta} \right) \quad (4.19)$$

$$g(x, \tau) = g \frac{x}{\delta} \quad (4.20)$$

Рівняння (4.17 і 4.18) справедливі в стадії регулярного режиму 2-го роду не тільки для усієї пластини товщиною 2δ , але і для любого шару товщиною $x_1-x_2=h$, якщо густина теплового потоку на його поверхні g_1 і g_2 не змінні з часом.

В любий момент часу стадії дискретного нагнітання тіста відбувається режим нагрівання валка із внутрішнім джерелом теплоти від тіста при товщині h , потужності його нагріву w , температурами t_1, t_2, t_3, t_4 . Відповідно швидкість зміни температури однієї із поверхонь валка для визначення ТФК тіста можна визначити по формулі, одержаної із (4.18, 4.19):

$$c_p = \frac{1}{h} \left[\frac{2(w^1(\Delta t_1^{11} + \Delta t_2^{11}) - w^{11}(\Delta t_1^1 + \Delta t_2^1))}{F(u^1(\Delta t_1^{11} + \Delta t_2^{11}) - u^{11}(\Delta t_1^1 + \Delta t_2^1))} - R_6 \right] \quad (4.21)$$

$$a = \frac{\lambda}{c_p}$$

де w – потужність утворена внутрішнім тертям тіста (електронегрівача), Вт;

u – темп нагрівання тіста, К/с, $u=dt/d\tau$;

Δt – перепад температур зразка із однієї сторони, К, при першому (¹) та другому різних температурних режимах (¹¹), причому $1.8 < u^1/u^{11} < 5$;

R_6 – термічний опір $m^2K/Вт$, рівний h/λ ;

P – термічна теплоємність, кДж/(m^2K) захисного шару, що відділяє внутрішнє джерело теплоти від валка, рівне $c_p h$.

4.3. Розподіл температури та її визначення в течії тіста при нагнітанні

Експериментальні дані отримані при дослідженнях нагнітання тіста валками показали, що локальна або однорідна зміна температури в його об'ємі пов'язана з локальною або односторонньою дією обертових валків. Механічна дія валків сприяє утворенню теплових хвиль із змінною амплітудою і періодом. Теплові хвилі можуть розвиватися по мірі зміни об'єму локальних дільниць.

Вони також розповсюджуються по всій масі завантаженого тіста в приймальний бункер формувальної машини.

Локальні і теплові деформації викликають деформування в сусідні об'єми тіста, що знаходяться на деякій віддалі від валків без зміни його температури. Локальне збільшення об'єму сприяє розвитку формування своєрідної «деформаційної хвилі». Характер формування деформаційних хвиль в структурі тіста зображено на рис. 4.4.

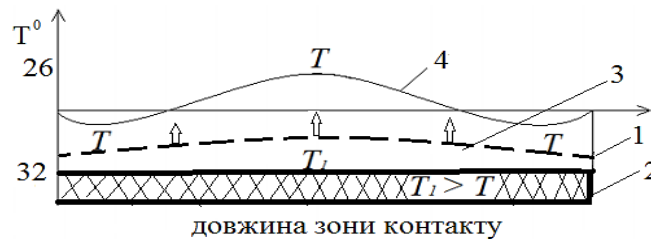


Рис. 4.4. Механізм формування теплової хвилі деформації при локальній дії валка на тісто: 1 – тісто; 2 – валок; 3 – зона розвитку температури при деформації; 4 – хвильова зміна деформації тіста; T – початкова температура; T_1 – змінена температура

Початковий розвиток деформаційних процесів на ділянках у структурі тіста практично відповідає початку дії обертових валків. Із цього випливає, що швидкість розповсюдження деформаційних теплових хвиль більша ніж швидкість утвореної теплової енергії та її передачі. Це приводить до самовільного утворення в тісті флуктуацій густини.

Поверхня валка при обертанні постійно змінює свою температуру (охолодження). При розгляді математичного опису динамічних процесів теплопередачі необхідно врахувати явища поздовжнього та поперечного руху тіста.

Температура T_1 утворена на стінці валка змінюється до T_2 . Температура охолоджуючої сторони валка дорівнює температурі зовнішнього середовища. Елементарний шар тіста (рис. 4.5) товщиною h рухається з переносною швидкістю v_0 і віддає стінці валка температуру по периметру L . Часткове перемішування захвачує периферійні елементи об'єму, що знаходяться в центрі течії. Вони переміщуються до периферії, тобто в глибину об'єму тіста, що знаходиться в завантажувальному бункері та до контакту з нагрітою частиною валка. Елементарний об'єм тіста із розмірами h (товщина), H (висота), B (ширина) знаходиться в контакті з поверхнею валка (охолоджуваного) в періоді

інтервалу процесу нагнітання, тобто $\tau_1 \leq \tau \leq \tau_1 + \Delta\tau$ і віддає за цей час деяку кількість тепла ΔQ . Викликана зміна температури стінки T_1 від встановленого значення T_2 на кількість тепла ΔQ_1 .

$$\Delta Q = \alpha / \Delta L (\Delta T_2^1 - \Delta T_1) \Delta \tau \quad (4.21)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі.

$$\Delta T_2^1 = \frac{\partial T_2^1}{\partial T_1} \Delta T_1 \quad (4.22)$$

де T – зміна температури елементарного об'єму тіста за час $\tau_1 = \tau_1 + \Delta\tau$.

За кінцевий інтервал часу $\tau_1 \leq \tau < \tau_2$ шар тіста віддає таку кількість тепла:

$$\Delta Q_\tau = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \alpha \Delta / \Delta L \left(\frac{\partial T_2^1}{\partial T_1} - 1 \right) \Delta T_1 d\tau \quad (4.23)$$

Розглянуті напрямки по визначенню реологічних властивостей, температурних потоків, часу перебування тіста в полі деформації дозволяє визначити раціональні параметри системи їх взаємодії. Тобто розподілення температури по поверхні валка із сторони входу і виходу маси тіста. Це дозволяє досить точно визначити розподіл температури, змодельовати її в зонах деформації та вільної від деформації.

Виділена теплова енергія у сполученні з тепловою енергією в'язкого тертя реалізується у формі, яку *гіпотетично* можливо вважати системою для перетворення теплової енергії у механічну роботу перемішування (зворотного руху) тіста. У відповідності до ідеального циклу Карно ККД такої системи визначається відомою залежністю[5]:

$$\eta = \frac{T_3 - T_2}{T_3}, \quad (4.24)$$

де T_3 – відповідно абсолютна температура тіста і в'язкого тертя.

$$T_3 = T_T + T_{тр.}; \quad (4.25)$$

де T_2 – температура тіста на виході з валкового зазору.

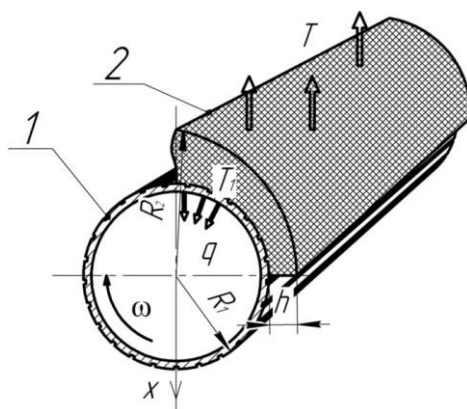


Рис. 4.5. Схема імпульсного фрикційного контакту: 1 - валок, мм; 2 – тісто; T – постійна температура; T_1 – температура на поверхні фрикційного контакту

Оцінка ККД у формі виразу скоріше за все може вважатися помітно наближеною, так як на режим нагнітання впливають конструктивні параметри, структура тіста (наявність газу) і гравітаційне поле. Однак за значних об'ємів тіста режим порушується і приводить до обмежених значень ККД.

Несталість значення Δt пов'язана з тим, що зі збільшенням значення h_0 (шару тіста в камері) температура зменшується (рис. 4.5). Температура має свої найбільші значення при виході тіста із зазору валків. Коефіцієнт тепловіддачі α_1 від тіста до стінки валка залежить:

- від його фізико-хімічних параметрів;
- швидкості руху валків, їх конструктивних параметрів;
- швидкості оновлення фаз в поперечних площинах;
- площі контакту в валковому зазорі (стискання).

Площа контакту в валковому зазорі має бути повноцінною реакцією системи на зміну утримувальної здатності по газовій фазі.

Для визначення кількості виділеної теплоти на поверхні тертя (границі розділу валок-тісто) виконаємо побудову зворотної моделі теплопровідності. Розрахунковим шляхом визначимо температуру нагріву тіста у зоні контакту з валками та на основі отриманих даних визначимо осьове зусилля потоку.

Оскільки градієнт температур у твердому тілі визначається за експериментальними вимірами, то тепловий потік можна розрахувати як добуток коефіцієнта теплопровідності твердого тіла на градієнт температур на

поверхні. У зворотному завданні теплопровідності використаємо метод кінцевих різниць для оцінки теплового потоку $q(t)$ на границі розділу при терті, за умови, що відомі значення перехідної температури на поверхні валка.

Експериментальні дані по визначенню температури нагрівання валка в процесі нагнітання одержували за допомогою термопар, які розташовані в зоні взаємодії. Зміну температури фіксували три термопари, що закріплені на поверхні валка відповідно на відстані 5; 15 і 25 мм від його бокової поверхні. Дані використаємо для розрахунку теплового потоку на поверхні в'язкого тертя (див додатки).

Під час планування експериментів із визначення функціональної зміни температури тіста застосовували стандартну симетричну план-матрицю трифакторного експерименту на трьох рівнях варіювання факторами для загального числа дослідів однієї повторності $N = p^k = 3^3 = 27$.

Експерименти провели в трикратній повторності кожного пронумерованого рядка план-матриці. Послідовність проведення першого та наступних експериментів встановлювали згідно з номерованим порядком рандомізованої план-матриці трифакторного експерименту. Рівні варіювання факторами та результати реалізації план-матриці, або експериментальний масив даних, отриманих під час проведення експериментів.

Обробку експериментального масиву даних провели з використанням пакету прикладної програми «Statistica-12» для комп'ютера.

Апроксимуючу функцію відгуку, або параметра оптимізації, тобто температуру тіста T , визначену експериментальним шляхом, знаходили у вигляді математичної моделі повного полінома другої степені:

$$T = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_{12} + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2,$$

де x_1, x_2, x_3 – відповідно, кодоване позначення тиску P тіста, діаметра вальців d , зазору між вальцями h ;

$b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – вільний член і коефіцієнти значень відповідного фактора x_i та їх взаємодії.

При рівні вірогідності $p=0,95$ та значення t -альфа критерію рівному 2,053, отримали такі статистичні дані: коефіцієнт множинної детермінації $D=0,962$; коефіцієнт множинної кореляції $R=0,981$; стандартне відхилення оцінки $s=0,637$; F – критерій Фішера дорівнює 467,71. Коефіцієнт D значимий з рівнем вірогідності $P=0,9999$.

Оцінку відтворюваності експериментів проводили за критерієм Кохрена при 5% рівні значимості. Коефіцієнти рівняння регресії або апроксимуючої функції, яку записано у вигляді $T = f_T(x_1; x_2; x_3)$ за умови ортогональності та симетрії план матриці планованого факторного експерименту, визначали згідно з стандартною методикою за відомими залежностями.

Після оцінки статистичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії за t_T -критерієм Стюдента та перевірки адекватності апроксимуючої моделі згідно з F -критерієм Фішера та переходу від кодованих позначень факторів до натуральних, отримано рівняння регресії, яке характеризує функціональну зміну температури тіста T залежно від зміни $200 \leq P \leq 700$ Н, $15 \leq h \leq 35$ мм, $155 \leq d \leq 165$ мм.

$$T = 36,4 + 4,2 \cdot 10^{-3}P - 1,7d + 0,06h + 2,510^{-4}Pd - 6,8 \cdot 10^{-5}Ph + 8,3 \cdot 10^{-3}dh + 5,8 \cdot 10^{-6}P^2 + 0,01d^2 - 8,0 \cdot 10^{-4}h^2.$$

Графічне зображення зміни температури тіста згідно експериментальних даних (рис. 4.6), тобто поверхня відгуку функціональної зміни температури тіста як функціонал $T = f_T(h; d)$.

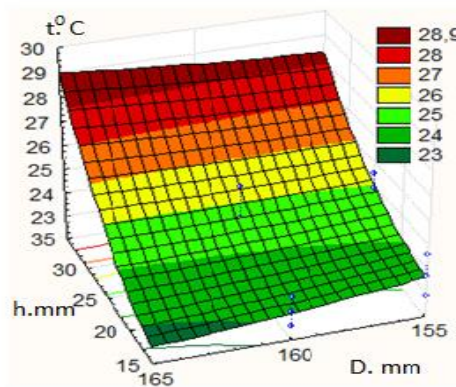


Рис. 4.6. Поверхня відгуку

4.3.1. Математичне моделювання зміни температури в тісті при нагнітанні

При проходженні дискретної деформації тіста валками, виділення тепла на границі розділу відбувається приблизно рівномірно. Цикл розповсюдження досить короткий і втрати тепла на випромінювання й конвекцію незначні. Тому можна припустити, що бічні поверхні валка перебувають в адіабатичному граничному стані і розподіл температури по площині, паралельній поверхні

тертя є рівномірним. Таким чином, температура в цій площині, апроксимується одним значенням у точці перетинання при одномірному аналізі методом кінцевих різниць.

Самі валки разом із тістом є багатошаровою циліндричною стінкою, що являє собою тільки $\frac{1}{4}$ взаємного контакту (рис. 4.7). У цьому випадку термічний опір багатошарової циліндричної стінки дорівнює сумі опорів окремих шарів. Перший шар є стінка валка, а наступний шар – тісто, що обробляється. Саме тісто умовно можна поділити на декілька шарів.

Процес руху тіста між обертовими валками можна умовно розділити на три зони. Після його стискання валками зона – 2, воно потрапляє в основну зону – 3 нагнітання, яку відповідно до рис. 4.7 можна умовно поділити на три ділянки – зону інтенсивного тепловиділення – 3, перехідна – 2 та ділянку відведення тепла – 1.

Для цієї частини у більшості конструкцій вузла нагнітання реалізується конвективний тепловий режим, який передбачає одночасну передачу теплоти випромінюванням і конвекцією.

Для отримання рівняння, що описує поширення теплового потоку утвореного в результаті існуючої температури тіста відповідно до рецептури і додаткової температури в'язкого тертя з зовнішнім тертям при фрикційному контакті до поверхні валка, необхідно знайти кількість теплоти, яка проходить через цей шар. Визначення зміни температурних потоків у шарі тіста дає можливість розрахувати кількість виділеної теплоти за один цикл нагнітання.

Теплова оцінка процесу течії у валковім зазорі особливо важлива для виробництва бубличної продукції. Розподіл температури по товщині циліндричної стінки (валок і середовище на його поверхні) логарифмічно залежить від координати r . На основі закону Фур'є щільність теплового потоку q визначається із рівняння:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dr} = -\frac{\lambda(T_1 - T_2)}{r \ln(r_2/r_1)} = \frac{\lambda(T_2 - T_1)}{r \ln(r_2/r_1)} \quad (4.25)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки валка, Вт/м^{°К}.

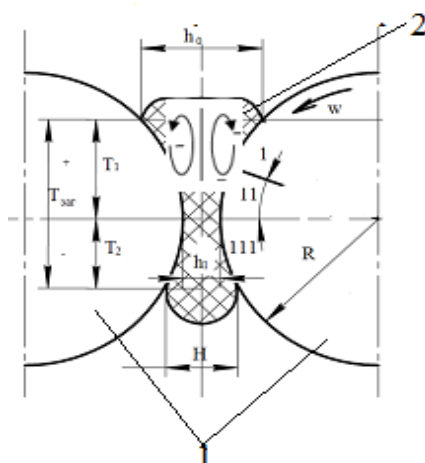


Рис. 4.7. Схема розподілу і циркуляції температурних хвиль при нагнітанні:
1 – обертові валки; 2 – робоче середовище – тісто

У нашому випадку кількість теплоти, яка поступає із тістом і проходить через циліндричну стінку, віднесена до одиниці довжини циліндра, може бути визначена за формулою:

$$Q = qA = q2r\pi = \frac{2\pi\lambda(T_1 - T_2)}{r \ln(r_2/r_1)} \quad (4.26)$$

де – $A = 2\pi rl$, при цьому Q залежить від r , оскільки теплота акумулюється в середовищі, що обробляється.

На рис. 4.8 наведена схема поперечного перерізу валка в робочій камері заповненою тістом для нагнітання та розподіл температури за радіусом валка.

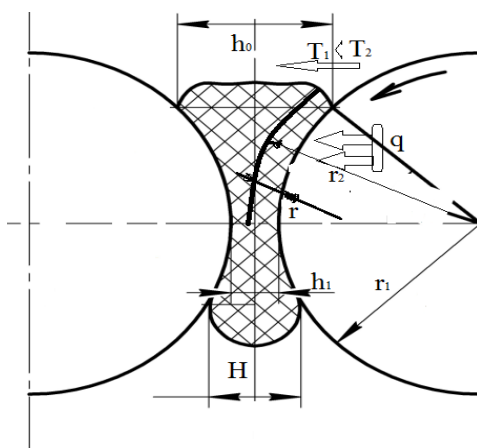


Рис. 4.8. Схема для визначення розподілу температури

Розглянемо одновимірний процес теплопровідності на циліндричній стінці валка з радіусом r_1 і зовнішнім радіусом шару тіста r_2 . Коефіцієнт теплопровідності тіста є постійна величина. На поверхні стінки вище згаданим дослідним шляхом визначено температуру. Умови вирішення задачі повинні містити рівняння теплопровідності у наступному вигляді:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (4.27)$$

Проведемо інтегрування: $T'' + \frac{1}{r}T' = 0$,

$$T' = S$$

$$S' + \frac{S}{r} = 0; \frac{dS}{dr} = -\frac{S}{r}$$

$$\int \frac{dS}{S} = -\int \frac{dr}{r}; \ln S = -\ln r + \ln C_1$$

$$\ln S = \ln \frac{C_1}{r}; S = \frac{C_1}{r}$$

$$\frac{dT}{dr} = \frac{C_1}{r}; \int dT = C_1 \int \frac{dr}{r};$$

$$T = C_1(\ln r + \ln C_2); T = C_1 \ln r + C_1 \ln C_2; T = \ln C_2 + \ln r^{C_1} = \ln C_2 r^{C_1};$$

$$T = C_2 + C_1 \ln r;$$

$$\begin{cases} 273.15 + 24 = C_2 + C_1 \ln 0.16 \\ 273.15 + 26.5 = C_2 + C_1 \ln 0.19 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 297.15 = C_2 - 1.833C_1 \\ 299.65 = C_2 - 1.661C_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 297.15 = C_2 - 1.833C_1 \\ 299.65 = C_2 - 1.661C_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 297.15 = C_2 - 1.833C_1 \\ 299.65 = C_2 - 1.661C_1 \end{cases}$$

$$0.02.50 = 0.172C_1;$$

$$C_1 = \frac{2.5}{0.172} = 14.535;$$

$$C_2 = 297.15 + 1.833 * 14.535 = 323.793;$$

Після інтегрування отримаємо загальний розв'язок рівняння, яке визначає розподіл температури по товщині r тіста при затягуванні валками:

$$T(r) = 323.793 + 14.535 \ln r, (^\circ\text{K}) \quad (4.28)$$

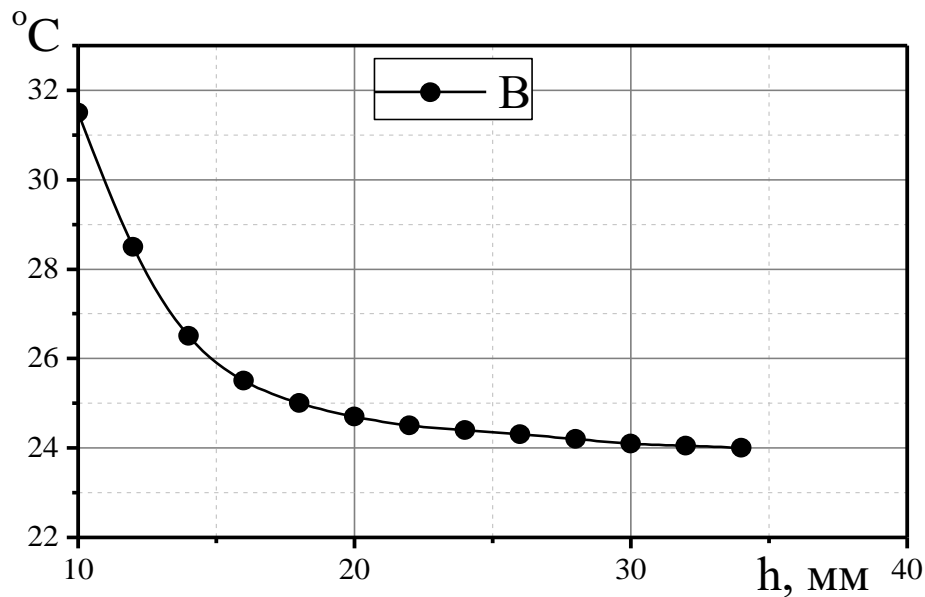


Рис. 4.9. Графік зміни температури тіста по товщині його шару на валку

Розподіл температури по товщині r тіста, теплоємність середовища, його об'єм, визначену кількість теплоти для кожного з досліджуваних валків з урахуванням їх конструктивних і технологічних параметрів можна знайти, підставивши їх у залежність:

$$Q = c\rho 2\pi R_1 l h(t_1 - t) \quad (4.29)$$

- де Q – кількість теплоти валка, Дж;
- R_1 – радіус валка, м;
- h – шар тіста на валку, м;
- t – температура тіста до обробки, °К;
- t_1 – робоча температура тіста, К;
- ρ – густина тіста, кг/м³;
- c – теплоємність тіста, Дж/кг*°С;
- l – довжина валка, м.

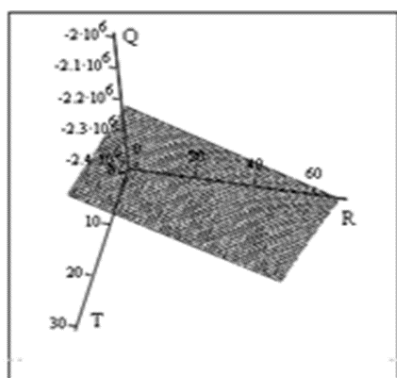
Зміна параметру теплоти від зміни густини тіста в процесі нагнітання трьома видами валків, представлено в таблиці 4.4

Таблиця 4.4

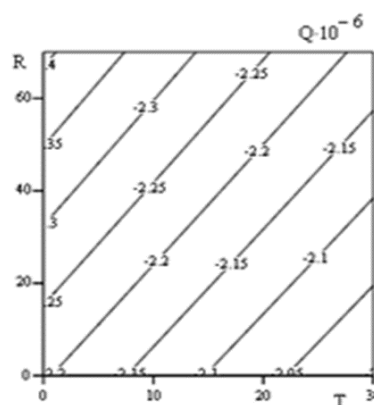
Залежність кількості теплоти від зміни густини тіста

Густина тіста ρ , кг/м ³	Кількість теплоти Q_1 , Дж	Кількість теплоти Q_2 , Дж	Кількість теплоти Q_3 , Дж
1180	68789,88	36687,94	5044,59
1178	68673,29	36625,75	5036,04
1176	68556,69	36563,57	5027,49
1174	68440,1	36501,39	5018,94
1172	68323,51	36439,2	5010,39
1170	68206,91	36377,02	5001,84

Опис впливу режимних характеристик роботи валка на температурні параметри відображено на графічних залежностях (рис. 4.11). Режимні характеристики зміни температури по товщині r тіста при затягуванні валками, розраховано згідно рівняння (4.29). Таким чином, на показники якості нагнітання впливають не конкретні чисельні значення режимних параметрів, а їх поєднання. Тому в числі заходів по обмеженню негативних впливів температур необхідно застосовувати ступінчасті режими зниження температур в наближенні до значень останніх, які б відповідали наступним режимам нагнітання.



а)



б)

Рис. 4.10. Залежності функції Q від температури T і радіусу шару тіста:
а) поверхня відгуку; б) лінії рівних рівнів

Завдяки законам деформації і циркуляції в об'ємі тіста буде більш нагріта поверхня валка, яка призводить до збільшення температури усього об'єму. Це протидіє активному масообміну в стиснутому об'ємі тіста валками та впливає на

створення умов відриву його від валків. Ліквідація цього недоліку може досягатися при досягненні миттєвого (максимального) тиску відриву, або при мінімальному значенні.

Очевидно, що зі збільшенням кута (діаметр валка) зтягування маси тіста в об'ємі робочої частини камери зростає, рівно як і поверхня теплопередачі. Така особливість вказаних співвідношень має важливе значення для випадків, за яких температурний перепад обмежується технологічними особливостями процесу виробництва бубличної продукції.

Оцінюючи впливи температурних факторів на процеси нагнітання, розкачування, змішування необхідно постійно сприяти і додержувати температурну стабілізацію тіста. При цьому останнє стосується всіх стадій процесу. Для керування температурним режимом важливим є підтримання початкової температури.

4.4. Особливості теплообміну в тісті при його нагнітанні обертовими валками

У вузлі нагнітання формувальної машини на всіх стадіях робочого процесу одночасно діють три збурювальні фактори: підведення чи відведення енергії з масою тіста (міграційний вплив), підведення чи відведення тепла та підведення механічної роботи.

При схематизації робочого процесу нагнітання тіста необхідно розділити його на окремі процеси, у яких виділити найбільш важливі фактори впливу, а другорядними знехтувати. Визначення зміни параметрів робочого середовища в робочій камері, що знаходиться на ділянці міжвалкового стиснення, розглянемо кількість теплоти, що надійшла у систему.

Завдяки дискретній дії з великою вільною поверхнею валка та малою площею контакту із масою середовища в робочій камері вузла нагнітання, теплообмін відбувається конвекцією. Передача теплоти відбувається шляхом теплопровідності всередині тіста, що відображається в числах Рейнольдса і Прандтля [1, 2].

Узагальнене критеріальне рівняння колективного теплообміну виражається функцією виду:

$$Nu = f(Re, Pr, \frac{L_1}{L_0})$$

де Pr – число Прандтля – фізичні властивості середовища і характеризує подібність фізичних властивостей теплоносіїв у процесі конвективного теплообміну. Для теплообміну при нагнітанні тіста (механічного переміщення) числами Фур'є, гомогенності і Фрудта можна знехтувати.

Тоді для даного виду теплообміну при русі середовища під дією валків можна привести у такому вигляді:

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda} = C Re^m Pr^n \left(\frac{L}{D}\right)^p$$

де D – діаметр валка, м;

L – довжина валка, м;

C, m, n, p – величини, які визначаються експериментально;

$Re = wL/v$ – число Рейнольдса;

$Pr = \nu/a$ – число Прандтля.

Кількість теплоти Q , що передається за одиницю часу від стінки валка (має постійно свою змінну температуру і є додатковим нагрівним джерелом) до середовища можна визначити:

$$Q = \alpha_2 F_c \Delta t$$

де F_c – поверхня теплообміну, яка приймається в даному випадку рівною поверхні контактуючого середовища з валком;

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки валка до середовища, що одержує додаткову температуру від в'язкого тертя;

Δt – різниця температур стінки валка і середовища біля його поверхні.

Якщо врахувати, що $\alpha_2 = \lambda Nu/D$, то загальний вираз кількості теплоти:

$$Q = \lambda \frac{Nu}{D} F_c \Delta t \quad (4.30)$$

Таким чином, знаючи значення змінних, отримаємо нове узагальнене критеріальне рівняння з якого можна визначити значення величини тепловіддачі.

При визначенні коефіцієнтів, що входять до рівняння (4.30), необхідно враховувати той факт, що на ділянці стиснення величина температурного напору за кутом повороту валка весь час змінюється, а величина коефіцієнта тепловіддачі α може бути визначена досить приблизно, оскільки при її визначенні необхідно враховувати наявність ділянки, що впливає на теплообмін. Також потрібно знати швидкість руху на поверхні валка та робочого тіста у зоні нагнітання. Ці величини можна визначити експериментально. Для визначення зміни температури та тиску за кутом повороту робочого валка на ділянці стиснення необхідно також знати масову витрату середовища.

Розглянемо процес руху середовища між обертовими валками. Після стискання середовища валками зона – 2, воно потрапляє в основну зону – 3 нагнітання, яку відповідно до рис. 4.11 можна умовно поділити на три складові – зону інтенсивного тепловиділення – 3, перехідну – 2 та зону відведення тепла – 1. Для цієї частини у більшості конструкцій вузла нагнітання реалізується конвективний тепловий режим, який передбачає одночасну передачу теплоти випромінюванням і конвекцією.

Утворювані теплові циркуляційні потоки частіше носять хаотичний характер, що також призводить до порушень загальної теплової циркуляції в середовищі. При цьому рівні таких порушень можуть бути достатньо глибокими зі змінами напрямків в контурах тіста.

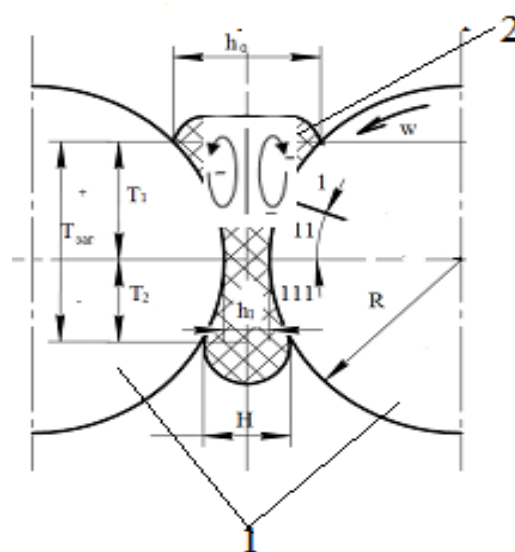


Рис. 4.11. Схема розподілу температури при нагнітанні:
1 – обертові валки; 2 – робоче середовище – тісто

Таким чином, гідродинамічні режими в нагнітальному вузлі формувальної машини визначаються двома причинами. Перша стосується теплового потоку, що утворюється на поверхнях валка. Друга причина стосується утворення потоків за участю газової фази.

Очевидно, що кожна з названих причин характеризується своїми рушійними факторами. Для першої причини таким фактором є різниця температур середовища і валкового теплоносія-охолоджувача. У другому випадку рушійним фактором є присутність диспергованої газової фази. Значення температурних потоків залежить від швидкості руху середовища та дискретності дії валків, маси тіста у робочій камері і завантажувальному бункері, що призводить до часткового зброджування цукрів. Певного рівня узагальнення може бути представлено утримувальною здатністю середовища по газовій фазі.

В досліджуваній системі первинне енергоджерело присутнє у формі хімічної енергії вуглеводнів, які мають трансформуватися у діоксид вуглецю. При цьому утворення діоксиду вуглецю має подвійний термодинамічний прояв, що супроводжується виділенням теплової енергії і утворенням диспергованої газової фази CO_2 . Газопроникливість тіста є критерієм оцінки кількості утримуючої газової фази.

Несталість значення Δt пов'язана з тим, що зі збільшенням значення h_0 (шару тіста в камері) температура в циркуляційній частині рідинної фази зменшується. Температура має свої найбільші значення при виході тіста із зазору валків. Коефіцієнт тепловіддачі α_1 від середовища до стінки валка залежить від фізико-хімічних параметрів середовища, швидкості руху валків, їх конструктивних параметрів; швидкості оновлення рідинної фази в поперечних площинах та площі контакту рідинної фази у валковому зазорі (стискання). Останнє має бути повноцінною реакцією системи на зміну утримувальної здатності по газовій фазі.

Пружно-пластична деформація зсуву тіста призводить до зменшення товщини стінок, їх розриву, злиттю (коалесценції) окремих бульбашок із утворенням меншого об'єму [5]. Для співставлення рівня зміни основних характеристик пружно-пластичних властивостей використовується коефіцієнт розрідження-густини [2].

$$K = \left(1 - \frac{a_k}{a_n}\right)$$

де a_k і a_n – кінцева і початкова величина модуля або в'язкості.

Отже, враховуючи складність теоретичного визначення величини конвективного теплового потоку \dot{Q}_k , при розрахунках використано поняття теплового потоку від стиснення тіста \dot{Q}_{cm} , що уже містить у собі величину питомої теплоти абсорбції конвективного теплового потоку. Визначення питомої теплоти абсорбції q_A базується на загальних закономірностях даного масообмінного процесу у валковій робочій камері.

Тепловий потік, що передається до або від рідинної фази робочого середовища, можна розрахувати за рівнянням [3]:

$$Q_A = q_D \cdot m_A = \frac{q_D \cdot T_{X1} \cdot (x_k - x_n)}{\mu_X},$$

де q_D – диференціальна теплота розчинення газу (компонента газу);

x_k, x_n – кінцева і початкова відносні молярні частки поглинутого газу в рідинній фазі робочого середовища;

μ_X – молярна маса рідини;

m_A – масова витрата абсорбованого газу (компонента газу).

При технологічних вимогах до пористої структури бублика, тому повинно відбуватися установа в тісті рівноважної концентрації щодо газової фази. Відповідно це описується законом Генрі [2, 4]

$$x_i = \frac{1}{E} \cdot p_i,$$

де x_i – молярна концентрація поглинутого газу в тісті, що знаходиться у термодинамічній рівновазі з газовою фазою, в якій парціальний тиск поглинутого компонента дорівнює p_i ;

E – константа Генрі, що визначається із залежності:

$$\ln E = -\frac{q_D}{R \cdot T} + \text{const.}$$

Для граничних умов, наприклад, за атмосферного тиску маємо:

$$\ln \left(\frac{E}{E_{\text{атм}}} \right) = \frac{q_D}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T} \right).$$

Кінцева концентрація поглинутого газу у тісті \bar{x}_k при розрахунку може бути такою, що дорівнює концентрації за умови рівноваги. Тоді, на підставі вище сказаного, тепловий потік, що передається до або від тіста в процесі нагнітання, буде:

$$Q_a = \frac{m_x p R \mu}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}$$

Саме тому в загальній теорії розрахунку вузла нагнітання необхідно враховувати процеси абсорбції у робочій камері, які теоретично на цей час зовсім не описані із-за значної складності процесу.

У цій методиці розрахунку витрати абсорбованого газу, як робоча температура, можна взяти як середню температуру газорідинної фази $t = 0,5 \cdot (t_x + t_y)$ та тиск $p = 0,5 \cdot (p_{y1} + p_{y2})$.

Загальний теплообмін поверхні валка із навколишнім середовищем, зважаючи на незначну різницю температур $T_x - T_{н.с}$, питомий тепловий потік $\tilde{q}_{н.с}$ може розглядатися у вигляді:

$$q_{н.с} = \frac{c \cdot (T_{ст} - T_{н.с})^n \cdot F_{ст}}{m_{y1}}$$

де $T_{ст}$ – температура зовнішньої стінки валка, що не взаємодіє із середовищем;

$F_{ст}$ – розрахункова поверхня валка;

c, n – емпіричні коефіцієнти, обираються згідно таблиці 4.5 для різних типів поверхонь.

Таблиця 4.5

Емпіричні коефіцієнти для визначення втрат тепла у навколишнє середовище

Тип поверхні	\bar{c}	\bar{n}
Вертикальна	1,4	1,33
Горизонтальна верхня	1,7	1,33
Горизонтальна нижня	0,64	1,25

При розрахунку температури валка в період всіх стадій (затягування, стискання, нагнітання) можна використовувати рівняння теплопередачі як плоскої пластинки із двохсторонньою віддачею тепла [3, 4]:

$$Vc\rho\delta\left(\frac{-\partial T}{\partial x}\right)dx = n\alpha(T - T_c)dx$$

де – швидкість руху валка;

с – питома теплоємність валка;

ρ – питома вага матеріалу валка;

δ – товщина циліндричної стінки валка;

x – віддаль пройдена валком із середовищем від попередньої стадії;

n – коефіцієнт, що враховує схему охолодження валка (при двохсторонній віддачі тепла n=2, а при односторонній – 1);

α – коефіцієнт тепловіддачі;

T_c – температура навколишнього середовища (охолоджувача).

Після інтегрування із врахуванням температури валка на виході із дільниці $T_{вих}$ отримаємо рівняння:

$$T = T_0 + (T_{вих} - T_c)exp\left(\frac{-n\alpha x}{\rho c K_1 V}\right) \quad (4.31)$$

де K_1 – поправочний коефіцієнт, що характеризує долю довжини валка з тістом на його поверхні.

Для визначення температури тіста після дискретної дії валка на нього, а також температури охолодження при виході з валкового зазору, використано рівняння теплопровідності для необмеженої плоскої стінки

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}$$

При умовах $\tau > 0$; $\delta/2 < x < \delta/2$;

$$T(x, 0) = f(x)$$

$$\lambda \frac{\partial T(\delta/2\tau)}{\partial x} = \alpha_{\text{в}} [T_0 - T(\delta/2\tau)]$$

$$\lambda \frac{\partial T(\delta/2\tau)}{\partial x} = \alpha_{\text{н}} [T_0 - T(-\delta/2\tau)]$$

де δ – товщина полоси тіста;

$\alpha_{\text{в}}$ і $\alpha_{\text{н}}$ – коефіцієнт тепловіддачі на верхній (зовнішній) і нижній (внутрішній) полосі тіста;

T_0 – температура навколишнього середовища (приміщення).

Враховуючи те, що охолодження відбувається за секунди на відкритому просторі перед подачею на формувальний пристрій машини, коефіцієнт тепловіддачі буде:

$$\alpha = \alpha_{\text{а}} \left(\frac{T^{0.04}}{29} + 1.2v^{0.1} \right)$$

де $\alpha_{\text{а}}$ – поправочний коефіцієнт;

v – швидкість руху шару тіста м/с.

Перший додатак формули відображає відведення тепла від валка за рахунок випромінювання, другий – за рахунок конвекції.

При розрахунку теплової моделі стану валка, в якості базових значень, коефіцієнта тепловіддачі прийняли при повітряному охолодженні – 150 ккал/м².ч.°С. Поправочний коефіцієнт K_1 для конкретного стану можна визначити шляхом порівняння експериментальних і розрахункових даних. Дослідним шляхом його можна визначити шляхом вимірювання температури валка на початку і в кінці дискретного процесу. Однак такі вимірювання не можуть бути виміряні з необхідною степенню точності. Тому єдиним способом визначення K_1 є порівняння розрахункової і фактичної температури валка при відомій температурі середовища.

З метою якісної оцінки теплових втрат у навколишнє середовище, які, як відомо, залежать від величини температури об'єкта, було виконано тепловізійну зйомку дослідної установки в цілому, результати якої наведені на рис. 2. Тепловізійна зйомка виконувалася для цілого ряду старих та нових валків при заданих технологічних режимах роботи формувальної машини. Результати, викладені на

рис. 4.12, було отримано вперше із застосуванням тепловізійної зйомки за допомогою тепловізора Fluke Ti25.

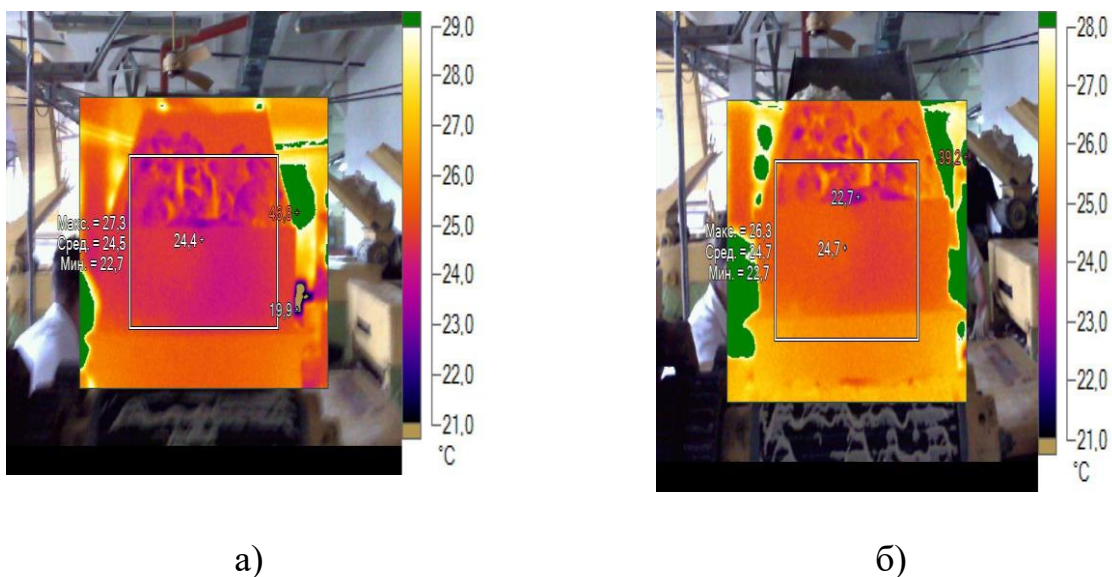


Рис. 4.12. Тепловізійна зйомка валкової робочої камери:
а) нової конструкції валка; б) існуючої конструкції валка

Результати розрахунку температури валків із сталі 08 кп при нагнітанні показані у вигляді кривих охолодження на рис. 4.13.

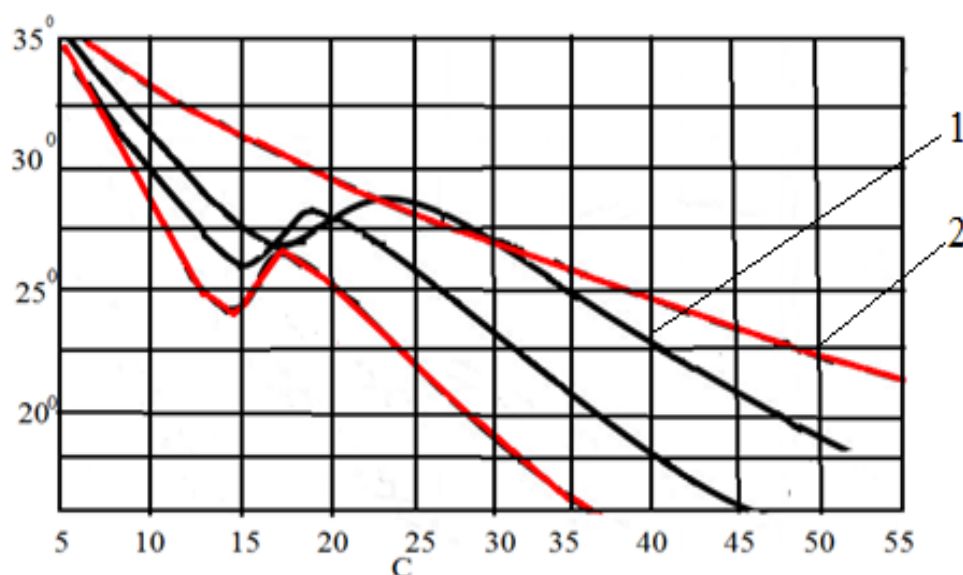


Рис. 4.13. Зміна температури поверхні валків у процесі нагнітання

Валки, згідно процесу, охолоджувались природнім способом при спокійнім повітрі у цеху. Починаючи з 18...27 с процесу стискання і нагнітання

(крива 1) для валка старої конструкції охолодження при спокійному повітряному середовищі має характер збільшення температури, як зовнішньої так і внутрішньої поверхонь на 25...28°C. В той же час, криві 2 нового валка мають більш плавний перехід температур при якійсій її віддачі середовищу. Цей процес триває на 5 с менше з охолодженням валка до температури 26°C, коли старого – 28°C. Це явище обумовлено тепловиділенням при в'язкій течії середовища і тертя поверхні валка. При нових конструкціях виділення додаткового тепла не відбувається.

При відповідному опорі деформації, розрахунок температури тісно пов'язаний з фазовими перетвореннями в середовищі. Такі теплофізичні параметри, як теплоємність c і коефіцієнт тепловіддачі α визначають точність прогнозування температури.

Зміну температури валка в зоні деформації і охолодження в період холостого ходу розраховували по формулі (4.31). Розрахунки виконані при умовах нагнітання: температура навколишнього середовища $T_c = 18^\circ\text{C}$; температура тіста – 28°C ; товщина шару тіста на валку прийнята – 25...35 мм; середня швидкість тіста – 2.0 м/с, густина $\rho = 1165 \text{ кг/м}^3$. Теплофізичні залежності властивостей бубличного тіста від температури визначаються формулами $\lambda(\text{Вт/мК})$, $c(\text{дж/кгК})$:

$$\lambda = 1.153(0.278 + 0.0045T)$$

$$C = 4167.4(0.58 + 0.0011T)$$

Розрахунки температури виконано для двох конструкцій валків при заданих технологічних режимах нагнітання (рис. 4.14).

На рис. 4.14 зображені залежності, що ілюструють теплову ефективність валків старої і нової конструкції після кожного дискретного нагнітання. У системі координат ці залежності мають вигляд прямих ліній з майже однаковим кутом нахилу, але різними значеннями. Можна відзначити досить вагому різницю ефективного накопичення та віддачі одержаної температури валком при взаємодії з середовищем. Одночасно із рисунка випливає, що після третього циклу нагнітання, температури мають однакове значення. Це свідчить про стабільність температури у подальшому нагнітанні середовища.

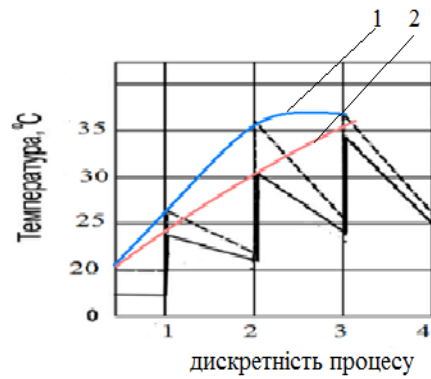


Рис. 4.14. Вплив стадійності процесу нагнітання на температуру валка:
1 – для старої конструкції; 2 – нової.

Аналізуючи наведені результати вимірювань та обчислень можна зробити такі загальні обґрунтування дії обертових валків на середовище:

- температура робочого середовища у радіальному напрямі збільшується при наближенні до робочого валка з перепадом у $(4 - 7)^\circ\text{C}$ при швидкостях $u = (0.4 - 1)\text{м/с}$ та відносному радіусу середовища на валку і самого валка $r_2/r_1 = 1,2$; величина цього перепаду залежить від величини ступеня підвищення стискування;

- температура робочого середовища на ділянці стиснення і нагнітання практично змінюється за кутом повороту валка, що свідчить про інтенсивне її транспортування і часткове перемішування;

- температура поверхні корпусу валка $t_{нов}$ розподілена за кутом його повороту рівномірно, при збільшенні тиску нагнітання зростає лінійно та повторює зростання температури на виході з різницею близько 7°C ;

- температура робочого середовища та поверхні валка в осьовому напрямку розподілена рівномірно у нових конструкціях. При визначенні температури в осьовому напрямку не було виявлено жодної її зміни.

Із наведених загальних обґрунтованих дій обертових валків на середовище можна зробити загальний напрямок по удосконаленню процесу:

- інтенсифікувати процес нагнітання можливо шляхом забезпечення сталості температур;
- збільшення поверхні теплообміну;
- виготовлення валка з матеріалу, що має максимальну теплопровідність;
- інтенсифікація процесу теплопровідності через стінку валка і тепловіддачі від стінки валка до внутрішньої пустотілої циліндричної поверхні;
- збільшення теплових втрат у навколишнє середовище (віддача тепла валком поверхнею, що не контактує з тістом).

4.5. Дослідження температурного поля та властивостей тіста у вузлах нагнітання

Нагрівання тертям при нагнітанні маси середовища валками та в інших технологічних процесах, активно досліджується як експериментально, так і теоретично. При нагнітанні валками – тертя та утворена максимальна температура з розподілом, значно впливають на структуру середовища і поверхню валка, а також на зусилля, необхідне для виконання процесу. Для розрахунку розподілу температури нагрівання валу тертям необхідно, насамперед, визначити швидкість виділення тепла на границі розділу середовище-валок. Існують чотири методи розрахунку виділення тепла при терті. Два з них засновані на коефіцієнті тертя, третій – на експериментальному визначенні розсіювання потужності, четвертий – на зворотній моделі теплопровідності для оцінки виділення тепла [12, 14]. У зворотній моделі переносу тепла [13] використовуються результати експериментів по вимірюванню температури в процесі його роздавання термопарами, закріпленими на різній відстані від поверхні контакту.

Розрахунок тепловиділення при нагнітанні тіста валками з використанням розглянутих методик, які ґрунтуються на вирішенні зворотної задачі теплопровідності. Для визначення виділення тепла на поверхні тертя (границі розділу валок-середовище) виконаємо побудову зворотної моделі теплопровідності. Експериментальні дані по визначенню температури нагрівання валка в процесі нагнітання, одержані за допомогою розташованих у зоні нагрівання термопар. Використаємо для розрахунку тепловий потік на поверхні тертя (рис. 4.15).

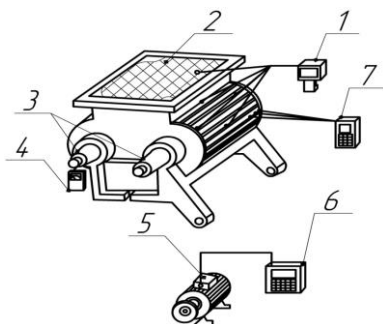


Рис.4.15. Схем установки для визначення температури: 1 – тепловізор;
2 – тісто; 3 – валки; 4 – тахометр; 5 – електродвигун; 6 – ватметр;
7 – осцилограф

Оскільки градієнт температур у твердому тілі визначається за експериментальними вимірами, то тепловий потік можна розрахувати як добуток коефіцієнта теплопровідності твердого тіла на градієнт температур на поверхні. У зворотному завданні теплопровідності використовуємо метод кінцевих різниць для оцінки теплового потоку $q(t)$ на границі розділу при терті, за умови, що відомі значення перехідної температури на поверхні валка.

При виборі цього параметра доводиться враховувати, з одного боку, зовнішні умови, зокрема мікроклімат цеху, з іншого – баланс тепла робочої камери машини (тобто тепло, що виділяється в процесі нагнітання, тепло внесене середовищем). З всіх чинників, більшою чи меншою мірою, вони впливають на загальну температуру середовища. Практично лише один виявляється придатним для активного впливу на середовище – температура, що утворюється в робочій камері при нагнітанні.

При нагнітанні валками створюються умови поверхневого та внутрішнього тертя в середовищі, що сприяє виділенню тепла на границі розділу. Вирішальне значення для оцінки якості терморегулювання має тривалість встановлення температури в чутливому середовищі. Це представляє особливий інтерес з точки зору порівняння якості чутливого валка в старому та новому виконанні. За своїм математичним змістом – це задача про нестационарне температурне поле в середовищі змінної температури. Вона ускладнена тим, що температура середовища змінюється не тільки в часі, але і по висоті робочої камери. Крім того, не можна точно сформулювати граничні умови, так як гідродинамічний процес відрізняється досить великою складністю і тому не можна з належною точністю задати коефіцієнт тепловіддачі.

Тому доцільно є насамперед з'ясувати експериментальним шляхом картину розподілу температури по всьому об'ємі робочої камери – темп і встановлення. Таким чином, обґрунтовано встановлено проведення експерименту: з'ясування характеру температурного поля середовища навколо валків по площині січення; з'ясування розподілу температури по висоті; визначення темпу зміни температури середовища в часі в різних точках по висоті робочої камери.

Температура вимірювалася за допомогою термопари хром – алюміній і записувалася шлейфовим осцилографом. При цьому забезпечувалася певна орієнтація термопари в площині, перпендикулярно осі чутливого елемента (кутовий крок $\pi/4$). Отримані осцилограми свідчать з повною визначеністю, що температурне поле практично симетричне осі ($dT/d\varphi=0$).

4.5.1. Визначення температури поверхні валка

При визначенні характеру температурного поля середовища по висоті було проведено зіставлення одночасного запису температури в двох поясах: спочатку у верхньому і нижньому, а потім у верхньому і середньому (із збереженням зазначеного розташування термопар). Отримані осцилограми свідчать про розшарування температури по висоті, але, разом з тим, привертає на себе увагу періодичність температурного ходу середовища, а також синхронність зміни температури па різній висоті. На рис. 4.16 представлена одна з осцилограм.

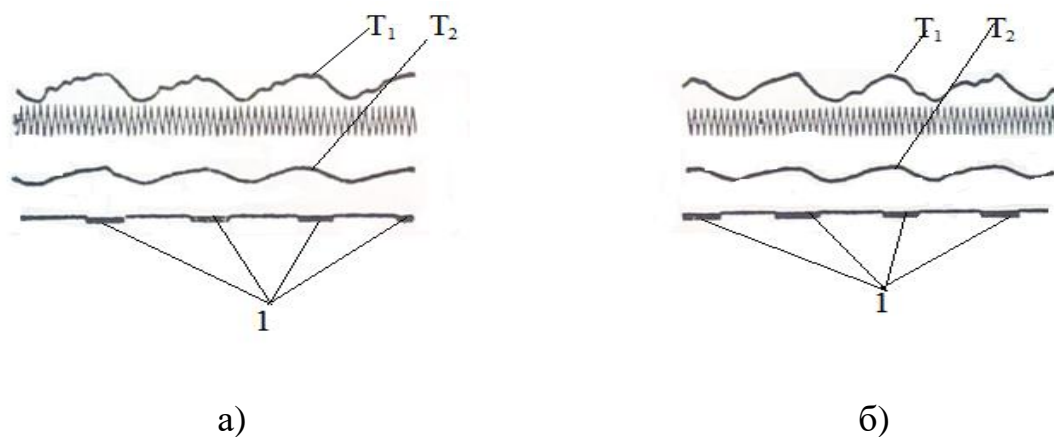


Рис. 4.16. Зміна температури над поверхнею валка 1 після
а) – шостого; б) – восьмого циклів нагнітання

Дослідження встановили, що відбувається майже рівномірне виділення тепла. Цикл виділення досить короткий, і втрати тепла на випромінювання й конвекцію незначні. Тому можна припустити, що бічні поверхні валка перебувають в адіабатичному граничному стані і розподіл температури по площині, паралельній поверхні тертя є рівномірним.

Заслуговує на увагу важлива для нас обставина, що температурні криві практично складені з лінійних відрізків. При цьому в якості характерного миттєвого значення параметра приймаємо його значення в середньому перерізі камери по висоті. Відповідно до цього, реальну картину зміни температури в об'ємі, також можна замінити картиною зміни її середньої арифметичної величини. Надалі прийняті наступні позначення:

T'' і T' – поточні температури середовища і валка;

τ – час;

c – теплоємність матеріалу валка;

ρ – його густина;

F – бокова поверхня;

V – об’єм;

r – радіус;

h – висота;

α – коефіцієнт тепловіддачі;

α , ρ , c , F і V – постійні параметри процесу.

Дійсна зміна температури по часі апроксимується лінійною функцією: $T'' = T' \theta \pm a \tau$, де позитивний знак при другому доданку відповідає прогріванню середовища, а негативний – охолодженню.

Рівняння теплообміну запишемо в наступному вигляді:

$$\alpha(T'' - T')F d\tau = c_p V dT', \text{ або } \frac{dT'}{d\tau} = \frac{\alpha F}{c_p V} (T'' - T').$$

Приймаємо позначення $k = \frac{\alpha F}{c_p V}$,

Отримуємо: $\frac{dT'}{d\tau} = k(T''_0 + \alpha r - T')$.

Для зручності оцінок будемо користуватися зручною системою одиниць (м, сек, град, ккал).

Початкову температуру середовища приймаємо за початок 0 відліку і відповідно вводимо позначення: $T' - T'' = \vartheta$.

ϑ - являє собою надлишкову температуру металу по відношенню до початкової температури середовища.

Таким чином, при охолодженні $\vartheta > 0$, а при нагріванні $\vartheta < 0$. Отже,

$$\frac{d\vartheta}{d\tau} = -k(\vartheta - \alpha r), \text{ або } \vartheta' + k\vartheta = k\alpha r$$

Це звичайне диференціальне рівняння, лінійне, першого порядку, неоднорідне. Його загальне рішення виходить як сума двох рішень: загального розв’язання однорідного рівняння ϑ і власного розв’язання неоднорозного рівняння ϑ_2 . Перше з них, з урахуванням початкової умови ($\vartheta = \vartheta_0$ при $\tau = 0$), визначається у вигляді:

$$\vartheta_1 = \vartheta_0 e^{-k\tau}$$

Це рішення за своїм фізичним змістом визначає процес встановлення температури середовища в разі однократної зміни зовнішніх умов (відразу після нагнітання, завантаження нової партії середовища в робочу камеру). В цьому випадку відношення $\vartheta/\vartheta_0 = 1$, монотонно має зменшуватися за експоненціальним

законом від початкового значення, але за рахунок тертя температура перебуває в змінному режимі.

Величина k має значення коефіцієнта відродження температурних неоднорідностей. Це безпосередньо впливає з того, що в умовах одноразового збурення виходить $-\frac{d\vartheta}{d\tau} = -k$. Таким чином, k – характеризує швидкість спадання ϑ у відносному поданні. Особливість процесу нагнітання полягає в тому, що відносна швидкість затухання залишається постійною. Чим більше k , тим швидше проходить відродження ϑ .

$$\text{Для } \vartheta_2 \text{ отримуємо: } \vartheta_2 = -\frac{\alpha}{k} + \alpha\tau$$

Друге рішення характеризує вплив температурного ходу середовища на процес зміни середньої температури валка.

$$\vartheta = \vartheta_0 e^{-k\tau} + \alpha\tau - \frac{\alpha}{k}$$

В умовах нагнітання, коли частина валка не знаходиться в контакті із середовищем, вільний рух повітря ззовні робочої камери виражений надзвичайно слабо і, як показує оцінка, ефективний коефіцієнт теплопровідності співпадає з істинним. Тому теплообмін в цій конструкції відбувається за рахунок теплопровідності і випромінювання.

Для визначення інтенсивності теплообміну введемо сумарний коефіцієнт тепловіддачі, представивши його у вигляді $\alpha = \alpha_K + \alpha_L$

При цьому перший доданок, відповідає конструктивному переносу тепла, визначиться у вигляді $\alpha_K = \frac{\lambda}{\vartheta_B}$

де λ – коефіцієнт теплопровідності повітря;

ϑ – товщина повітряного прошарку.

Другий доданок, що характеризує теплообмін випромінюванням, знаходиться з рівняння

$$\alpha_L = c \frac{\left(\frac{T_{тр}}{1000}\right)^4 - \left(\frac{T_{ст}}{1000}\right)^4}{T_{тр} - T_{ст}} \equiv c\vartheta$$

де $T_{тр}$ – абсолютна температура внутрішньої поверхні валка;

$T_{ст}$ – абсолютна температура поверхні валка;

c – коефіцієнт випромінювання системи валка.

Коефіцієнт c визначається за формулою

$$c = \frac{1}{\frac{F_{\text{ст}}}{F_{\text{тр}}} \left(\frac{1}{c_{\text{ст}}} - \frac{1}{c_{\text{в}}} \right)}$$

Тут, $c_{\text{ст}}$ і $c_{\text{тр}}$ – відповідно коефіцієнти випромінювання абсолютно чорного тіла та матеріалу валка. Через малу товщину і високу теплопровідність стінки валка можна вважати, що температура її обох поверхонь однакова.

Після підстановки чисельних значень

$$c = 2,9 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{ч} (\text{°K})^4}$$

Знаходимо: $\alpha \approx 30 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{ч град}}$. Таким чином проведено оцінювання коефіцієнта тепловіддачі чутливого валка. Так як прошарок поверхні валка заповнений середовищем, тому теплообмін випромінюванням виключений. Для коефіцієнта тепловіддачі знаходимо $\alpha = \frac{\lambda}{\vartheta} = 245 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{ч град}}$.

Тривалості встановлення температурного режиму, виходячи з умови, що відносна надмірна температура в усіх випадках нагнітання має однакове задане значення, тому:

$$\tau = \frac{\ln \frac{\vartheta}{\vartheta_0}}{k}$$

Таким чином, час встановлення температурного режиму є величина, зворотна k

$$\frac{\tau_0}{\tau_1} = \frac{k_1}{k_2} \text{ або } \frac{\tau_2}{\tau_1} = \frac{\alpha_1 (c \rho)_2 F_1 V_2}{\alpha_2 (c \rho)_1 F_2 V_1}$$

Підставляючи чисельні значення, отримуємо $\frac{\tau_2}{\tau_1} \approx 16$ сек.

Зіставлення цього результату з оцінкою тривалості часу встановлення по осцилограмах свідчить про хороше узгодження даних розрахунку і експерименту. Зрозуміло, що шістнадцятикратне зменшення власного часу показує, що вимір термопарою у нашому вигляді володіє істотними перевагами, які в практичних умовах будуть особливо помітні.

У процесі нагнітання середовища, що заповнює зазор між валками, рухається з помітною швидкістю по поверхні валка. Все це сприяє інтенсифікації теплообміну. Як уже було зазначено, в цих умовах точно визначити коефіцієнт тепловіддачі неможливо – занадто складні гідродинамічні умови. Тому є всі підстави припускати, що в робочих умовах час для встановлення елементів термопар буде мати цілий ряд невизначених проблем.

4.5.2. Визначення властивостей тіста

З метою якісної оцінки теплових втрат у навколишнє середовище, які, як відомо, залежать від величини температури об'єкта, було виконано тепловізійну зйомку дослідної установки в цілому, результати якої наведені в додатках. Тепловізійна зйомка виконувалася для валків з насічками та валків з пазами при заданих технологічних режимах роботи формувальної машини за допомогою тепловізора Fluke T i 25 (похибка тепловізора лежить в межах 1,5–2°C).

Нами проведено порівняння зміни температури тіста при його нагнітанні на досліджуваних вузлах. Проведені дослідження температури за період виконання нагнітання тіста трьома конструкціями валків при заданих технологічних режимах приведено на рис. 4.17.

З рис. 4.16 випливає, що зміна температури тіста завантаженого в робочу камеру, для кожного вузла нагнітання має різні значення. Найбільші значення зміни температури відбуваються у валках машини конструкції 1968 р., тобто вона досить стрімко зростає до 15 хв процесу при значенні температури 31.5°C, а починаючи з 15 хв зменшується на 0.5°C, тобто до завершення усього циклу. Враховуючи конструктивні зміни машини 2015 р., тісто має зростання температури до 28°C на 12 хв. процесу. Починаючи з вказаного періоду тісто поступово зменшує свої значення. Досить велика різниця присутня на валках розробленої конструкції. Значення температури практично не змінюється протягом усього процесу і вона знаходиться в діапазоні 24–23°C.

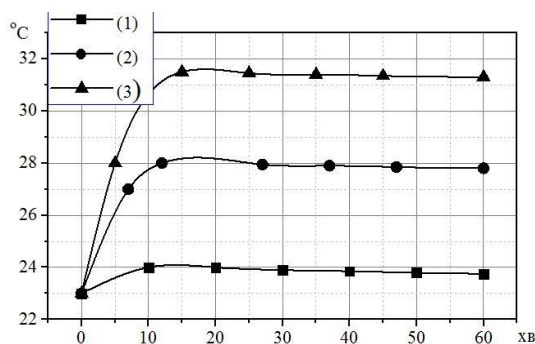


Рис. 4.17. Графік зміни температури тіста за період дискретно-нагнітального циклу: 1 – машини 2017 р.; 2 – машини 2015 р.; 3 – машини 1968 р. випуску

Відповідно досліджень, нами проведено визначення теплофізичних характеристик бубличного тіста із пшеничного борошна на етапах його дискретного нагнітання усієї замішаної маси. Розрахунки виконані при умовах нагнітання: температура навколишнього середовища $T_c = 18^{\circ}\text{C}$; температура тіста – 28°C ; товщина шару тіста на валку прийнята – 20–22мм; середня швидкість тіста – 2.0м/с, густина $\rho=1165\text{кг/м}^3$.

В таблиці 4.6 наведено теплофізичні властивості тіста: питома (масова) теплоємність, теплопровідність, густина. Властивості завантаженої маси тіста в робочу камеру змінювалися від часу дискретності процесу формування тобто, кожної завантаженої маси в робочу камеру (кожного наступного циклу нагнітання).

Таблиця 4.6.

Теплофізичні властивості пшеничного тіста

Етап нагнітання бубликового тіста	Стан тіста після технологічного процесу						
	t, °C	Густина ρ , кг/м ³		Теплоємність C, Дж/(кг°K)		Теплопровідність λ , Вт/(м°K)	
		Після нагнітання	Після нагнітання	Після формування	Після нагнітання	Після формування	Після нагнітання
Замішане	26.5	1190	1180	0.648	0.680	0.355	0.360
Після 60хв. деформацій	28	1160	1153	0.695	0.705	0.362	0.372
Після 100хв. деформацій	32	1090	1030	0.708	0.718	0.380	0.4

Таблиця 4.7.

**Теплофізичні властивості пшеничного тіста при
нагнітанні новим валком**

Етап нагнітання	Стан тіста після технологічного процесу						
	t, °С	Густина ρ , кг/м ³		Теплоємність С, дж/(кг°К)		Теплопровідність λ , Вт/(м°К)	
бубликового тіста	Після нагнітання	Після нагнітання	Після формування	Після нагнітання	Після формування	Після нагнітання	Після формування
Замішане	26.5	1190	1188	0.648	0.65	0.355	0.65
Після 60 хв деформацій	25.7	1190	1189	0.65	0.65	0.357	0.352
Після 100 хв деформацій	26	1179	1189	0.66	0.672	0.36	0.364

Із аналізу таблиць досить чітко видно, що теплофізичні властивості тіста при впливі деформації нової конструкції валка майже залишаються на одному рівні.

4.6. Рівняння енергетичного балансу. Визначення питомої потужності вузла нагнітання

Одним зі 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.

Машини, що спрямовані на формування в'язкого середовища, повинні впливати на нього таким чином, щоб втрати сировини і готової продукції були мінімальними, а якість виробів висока. Такий підхід спонукає до необхідності забезпечення повної відповідності режимів обробки, конструктивних форм і параметрів робочих валкових органів, структурно-механічним властивостям в'язкого середовища.

Поставлена проблема визначила сучасні тенденції конструювання валкових робочих органів у машин різного класу, де вони виконують робочі процеси: розкачування, нагнітання, замішування, транспортування. Аналіз існуючих методів розрахунку машин з валковими робочими органами передбачає визначення коефіцієнта подачі, конструктивних параметрів, споживаної потужності та впливу реології на течію маси середовища між валками. Методи розрахунку свідчать про розрізненість підходів різних авторів. Вони пов'язані з введенням великої кількості експериментальних коефіцієнтів для співвідношення робочих середовищ. Спостерігається практична відсутність у визначенні режимів роботи машин з валками, розрахунок впливу процесів на роботу валків враховувався не всіма дослідниками та різною мірою.

Тому постійно необхідно спрямовувати свої розрахунки на конструктивні параметри та оптимізацію геометрії профілю конструктивних елементів, застосування збірних конструкцій, використання матеріалів і покриттів. Як варіант виконання такого нагнітального валкового вузла більш детально описано в розділі 5.

Вартим уваги може бути той факт, що у більшості випадків в дослідженнях не враховувались втрати енергії фізико-хімічних зв'язків при визначенні оптимальних методів виробництва.

Одним з факторів, який характеризує процес перетворення вхідного середовища 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 оброблюваного середовища [2]. Як приклад таких процесів може бути нагнітання, розкачування тіста тощо. При цих процесах енергія частково витрачається на утворення нових хімічних зв'язків, а частково втрачається в навколишньому середовищі.

Розглянемо рівняння робочого процесу в робочій камері з гомогенним станом робочого середовища. При розрахунках газ вважаємо ідеальним і внаслідок незначної зміни його температури у процесі стиснення беремо сталість величин питомих теплоємностей.

Запропонований термодинамічний опис робочого процесу базується у вигляді термомеханічної системи відкритого типу, що знаходиться в енергетичній взаємодії з навколишнім середовищем у квазістаціонарній рівновазі. Термодинамічна модель у загальній системі має дві підсистеми з двофазовим станом робочого тіста та з енергообміном через відкриту межу, що розділяє ці підсистеми. Розрахункову схему енергобалансу валкового

нагнітання, розкачування, замішування можна подати за методом «чорного ящика» (рис. 4.18).

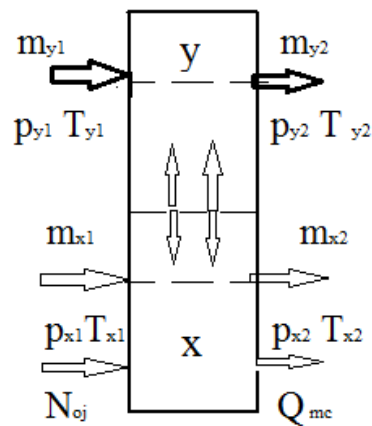


Рис. 4.18. Розрахункова схема енергобалансу середовища (дріжджове тісто) на дільниці нагнітання

У поданій схемі використано такі позначення:

X – рідинна підсистема;

U – газова підсистема.

Із деяким припущенням загальної системи по відношенню області U вважаємо, що підсистема X отримує від зовнішнього джерела енергію. Дана енергія характеризується величиною споживаної потужності валка без урахування потужності механічних втрат в ущільненні вала та підшипниковому вузлі, N_{oi} . Одержавши цю механічну енергію, підсистема X здатна виконати у підсистемі U технічну роботу. Внаслідок її дії відбувається зміна термічних параметрів тиску p_y і температури T_y газової підсистеми та усієї системи в цілому. Така зміна параметрів необхідна для реалізації цільового призначення течії системи між валками.

Процес зазначеного енергообміну між підсистемами супроводжується дисипацією частини підведеної енергії, яку, як правило, відносять до категорії гідравлічних втрат. У багатьох розрахункових визначеннях енергетичних характеристик використовується коефіцієнт гідравлічних втрат [3]. Через складність процесів руху загальної системи, не можливо користуватися кореляційними коефіцієнтами при визначенні енерговитрат у валкових машинах. Нами запропонована термодинамічна модель енергообміну в зазорі між валками, яка не вимагає введення кореляцій на основі дослідних даних за розподіленням

швидкостей рідини. Їх точність порівняно нижча відносно вимірювань полів температур (рис.4.6).

Рівняння теплового балансу елементу диспергованої газової фази можна записати у вигляді рівняння [4]:

$$q_{гр} = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial \rho} \right)_{гр} = r \rho_{газ} \frac{dR}{d\tau} \quad (4.31)$$

де r – питома теплота випаровування;

R – радіус елементу диспергованої газової фази;

τ – час.

За умови інтегрування в межах радіуса елементу диспергованої газової фази від 0 до $R_{дгф}$, та часу τ від 0 до τ_0 (τ_0 – загальний час існування елементу диспергованої газової фази). В результаті отримуємо

$$\int_0^{\tau_0} q_{гр} d\tau = \int_0^{\tau_0} r \rho_{газ} \frac{dR}{d\tau} d\tau \quad (4.32)$$

$$q_{гр} \tau_0 = r \rho_{газ} R_{дгф}, \quad (4.33)$$

$$q_{гр} = \frac{r \rho_{газ} R_{дгф}}{\tau_0} \quad (4.34)$$

Загальний тепловий потік від середовища до окремого елементу диспергованої газової фази визначається залежністю [4]:

$$Q_{гр} = N_{заг} q_{гр} = (N + N_{рух}) \frac{r \rho_{газ} R_{дгф}}{\tau_0} \quad (4.33)$$

З іншого боку, густина теплового потоку відповідає тепловому потенціалу, який за час τ_0 переноситься через межу поділу фаз (рідина/газова фаза) з молекулами речовин, які випаровуються.

Допускаючи відсутність енергомасообміну у вузлі нагнітання із зовнішнім середовищем (витоки через ущільнення), рівняння балансу енергії у межі системи має вигляд:

$$N_{oi} \pm \dot{Q}_{н.с} \pm \dot{Q}_T = \sum \Delta H, \quad (4.33)$$

де $\sum \Delta H$ – сума змін повної ентальпії робочого середовища, (у перетині межі даної системи);

N_{oi} – потужність, що підводиться до робочого валка;

$\pm \dot{Q}_{н.с}$ – тепловий потік між системою і навколишнім середовищем;

$\pm \dot{Q}_T$ – тепловий потік в системі (в'язке тертя).

У переважній більшості випадків цей потік спрямований у навколишнє середовище, тому надалі він розглядатиметься як від'ємна величина у загальному рівнянні енергобалансу вузла нагнітання.

Що стосується величини $\sum \Delta H$, то її можна подати на базі зазначеної схеми (див. рис. 1) таким рівнянням:

$$\sum \Delta H = \Delta H_Y + \Delta H_X \quad (4.35)$$

або

$$\sum \Delta H = (m_{Y2} \cdot h_{Y2} - m_{Y1} \cdot h_{Y1}) + (m_{X2} \cdot h_{X2} - m_{X1} \cdot h_{X1}). \quad (4.36)$$

де m_Y і m_X – масові витрати робочого середовища;

h_Y, h_X – питомі ентальпії середовища;

індексами «1» і «2» у вказаних величинах позначені вхідні й вихідні стани складових робочого середовища.

У ряді окремих випадків індексація параметрів для складових ΔH може відрізнитися від записаної у рівнянні (4.36).

З огляду на запропоновані зміни масових витрат як газу, так і рідини при протіканні їх між валками рівняння (4.34) з урахуванням (4.36) можна подати у питомих величинах. Для цього позначимо часткове співвідношення масових витрат щодо вхідної величини для середовища Y, так як це співвідношення постійно змінне:

$$g = \frac{m}{m_{Y1}} \quad (4.37)$$

На основі цього отримаємо з рівняння (4.34) вираз для питомої роботи вузла нагнітання:

$$l_{oi} = (g_{Y2} \cdot h_{Y2} - h_{Y1}) + c_f \cdot (g_{X2} \cdot T_{X2} - g_{X1} \cdot T_{X1}) + \tilde{q}_{н.с.} \quad (4.38)$$

$$\text{або } l_{oi} = l_Y + l_X + \tilde{q}_{н.с.} \quad (4.39)$$

Отже, величину питомої роботи вузла нагнітання і, як наслідок, питомої потужності можна визначити, знаючи питомі роботи кожної підсистеми та втрати тепла у навколишнє середовище [4, 5]. З рівняння (4.39) бачимо, що питому роботу можна знайти, визначивши питомі масові витрати середовищ та термічні параметри кожної підсистеми.

Як правило, при порівнянні енергоефективності використовують поняття питомої потужності

$$N_{num} = \frac{N_e}{\dot{V}_{Y1}}$$

або після перетворень

$$N_{num} = \frac{N_{oi} \cdot \rho_{Y1}}{\dot{m}_{Y1} \cdot \eta_{мех}} = l_{oi} \cdot \frac{\rho_{Y1}}{R_{Y1} \cdot T_{Y1} \cdot \eta_{мех}}; \quad (4.40)$$

У цих рівняннях позначено:

N_e – ефективна потужність на валу валка;

\dot{V}_{Y1} – об’ємна продуктивність машини за умов затягування;

$\eta_{мех}$ – механічний ККД машини;

ρ_{Y1} – густина газового середовища Y на вході до валків;

R_{Y1} – газова стала за умов входу;

$\tilde{q}_{н.с.} = \dot{Q}_{н.с.} / \dot{m}_{Y1}$ – питомий тепловий потік у навколишнє середовище.

У більшості випадків для нагнітання, розкачування, змішування застосовують гомогенні рідкі середовища, що дозволяє записати рівняння у вигляді:

$$N_{пит} = \frac{\rho_{Y1}}{R_{Y1} \cdot T_{Y1} \cdot \eta_{мех}} \times [(g_{Y2} \cdot h_{Y2} - h_{Y1}) + c_f \cdot (g_{X2} \cdot T_{X2} - g_{X1} \cdot T_{X1}) + \tilde{q}_{н.с.}]. \quad (4.41)$$

Для нашого випадку, вважаємо, що:

- газ однокомпонентний, ідеальний;

- рідина гомогенна, не стискувана;
- відсутня розчинність газу, конденсація і випаровування рідини.

На основі викладеного, рівняння (13) спрощується, так як $\dot{m}_{Y2} = \dot{m}_{Y1}$, звідки $g_{Y2} = 1$; $\dot{m}_{X2} = \dot{m}_{X1}$; $h_{Y2} - h_{Y1} = c_p \cdot (T_{Y2} - T_{Y1}) = c_p \cdot T_{Y1} \cdot \left(\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1\right)$.

Враховуючи вищенаведені спрощення рівняння (4.41), його можна переписати таким чином:

$$N_{num} = \frac{p_{Y1}}{R_{Y1} \cdot \eta_{mex}} \cdot \left[c_p \cdot \left(\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) + g_{X1} \cdot c_f \cdot \frac{\Delta T_X}{T_{Y1}} + \frac{q_{н.с.}}{T_{Y1}} \right]. \quad (4.42)$$

де c_p – питома масова ізобарна теплоємність робочої газової складової середовища;

$\pi = p_{Y2}/p_{Y1}$ – ступінь підвищення тиску газової складової середовища;

n – показник політропи стиснення;

c_f – питома масова теплоємність робочої рідини;

$\Delta T_X = T_{X2} - T_{X1}$ – нагрівання робочої рідини у системі.

Отже, із рівнянням (4.42) можна визначити значення питомої потужності.

Тепловий потік від газу, при стисненні, напрямлений не лише всередину до рідини, але й до поверхонь, що утворюють її об'єм, тобто до прилеглих поверхонь робочої камери та валкового робочого органу.

Припустимо, що ці поверхні є тепловими мостами тільки до рідини, і таким чином виключаємо тепловий потік від газу у навколишнє середовище.

Розрахункове визначення компонентів l_X і l_Y , як і головного зв'язку $\Delta T_X = f(g_{X1}, n)$, вимагає розгляду енергетичних балансів відповідних підсистем. Оскільки вони взаємозв'язані між собою, то для визначення шуканого параметра l_X та інших величин, пов'язаних із ним, розглянемо енергетичний баланс рідинної підсистеми.

Енергетичний баланс рідинної підсистеми подано на рис. 4.19.

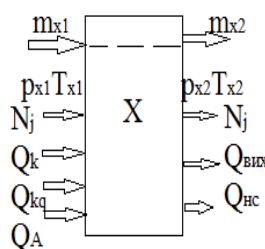


Рис. 4.19. Схема енергобалансу рідинної підсистеми

Рівняння збереження енергії для рідинної підсистеми тіста має вигляд

$$Q_k + Q_{к\delta} + Q_A - Q_{вип} - Q_{н.с} + N_{oi} - N_i = \Delta H_X. \quad (4.43)$$

де Q_k – конвективний тепловий потік, що відводиться від газового середовища, яке стискається;

$Q_{к\delta}$, $Q_{вип}$ – теплові потоки, що пов'язані з процесами конденсації і випаровування робочої рідини;

Q_A – тепловий потік, що зумовлений процесом абсорбції газу (або окремого компонента газу) у робочій рідині;

N_i – потужність політропного процесу стиснення газу;

N_{oi} – потужність на валку.

По суті дане рівняння відображає, від чого залежить нагрівання рідини у вузлі нагнітання, оскільки ΔH_X пропорційне ΔT_X .

Підставивши питомі величини у рівняння (4.43) та зробивши перетворення, отримає вигляд:

$$c_f \cdot (g_{X2} \cdot T_{X2} - g_{X1} \cdot T_{X1}) = q_k + q_{к\delta} + q_A + q_{вип} + q_{н.с} + l_{зідр}. \quad (4.44)$$

де $l_{зідр} = (N_{oi} - N_i)/m_{Y1}$ – питома робота, що затрачується на подолання гідравлічних опорів у середовищі (дисипативна складова витрат енергії на рух робочої рідини). Величина питомої роботи може бути визначена, із експериментальних досліджень.

Рівняння (4.44) розв'язується відносно параметра T_{X2} за наявності додаткових залежностей для кожного із шести членів правої частини цього рівняння: питомих теплових потоків від конвективного теплообміну між газом та рідиною q_k , від процесу конденсації парової фази рідини $q_{к\delta}$, від абсорбції компонентів газової суміші у робочу рідину q_A , від випаровування робочої рідини у стискуваний газ $q_{вип}$, від теплообміну з навколишнім середовищем $q_{н.с}$ та питомої роботи гідродинамічних втрат у робочій камері вузла машини. Визначення вказаних величин можливе, виходячи із загальноприйнятих законів та закономірностей процесів тепломасообміну.

$$T_{X2} = \frac{g_{X1}}{g_{X2}} \cdot T_{X1} + \frac{q_k + q_{к\delta} + q_A - q_{вип} - q_{н.с} + l_{зідр}}{c_X \cdot g_{X2}}. \quad (4.45)$$

Температурні показники в процесі нагнітання стосуються одночасно мікробіологічних, фізичних і хімічних впливів. Вони можуть бути такими, що наближаються до оптимальних при стабілізації температури за рахунок теплообміну середовищ. Тому головним недоліком на наш погляд є накопичення до певних значень теплоти в середовищі. Такі процеси: конденсації парової фази рідини q_{kd} , абсорбції компонентів газової суміші у робочу рідину q_A , випаровування робочої рідини у стискуваний газ $q_{вип}$, ми не враховуємо, так як всі вони мають досить обмежений період свого існування або компенсуються теплообміном. На основі цього:

$$T_{X2} = \frac{g_{X1}}{g_{X2}} \cdot T_{X1} + \frac{q_k - q_{н.с} + l_{гидр}}{c_X \cdot g_{X2}}. \quad (4.46)$$

Питома робота гідродинамічних втрат у робочій камері вузла машини може бути визначена з виразу:

$$l_{гидр.оберт} = \frac{k_{оберт} \cdot \rho_X \cdot \omega^3 \cdot R_2^5}{m_{Y1}}, \quad (4.47)$$

де ρ_X – густина робочого середовища;

ω – циклічна частота обертання валка;

$k_{оберт}$ – коефіцієнти потужності, що визначається експериментально;

R – радіус тістової маси на валку.

Він залежать від геометрії валків та чисел Рейнольдса $Re_{оберт}$ і визначається залежністю:

$$Re_{оберт} = \frac{2 \cdot \omega \cdot r_2^2}{\nu_X}, \quad (4.4)$$

де ν_X – кінематична в'язкість робочого середовища при середній температурі.

Вплив температури робочого середовища T_X визначається величиною кінематичної в'язкості ν_X .

Для подальшого використання процесу нагнітання у валкових машинах необхідно спрямовувати та створювати різні конструктивні та технологічні схеми, що спрямовані на умови додержання допустимих температурних потоків. Охолодження нагрітої поверхні валка повинно якісно здійснюватися за

рахунок конвективного теплообміну з навколишнім середовищем. Напрями руху температурних потоків при використанні удосконалених теплообмінних процесів будуть більш розсіюватися.

4.7. Визначення корисної потужності при розкачуванні тіста в термінах реологічних параметрів

Основними даними необхідними для розрахунку валкових робочих органів є крутний момент, споживана потужність та зусилля їх дії на тісто при його нагнітанні. Ці величини різними дослідниками визначалися по методиках [9, 11], що засновані на закономірностях пластичної або пружної деформації матеріалу між валками. Дослідження базувалися на гідродинамічній теорії вальцювання та теорії подібності.

Не в повній мірі звернена увага на вплив зазору між валками, кута живлення та нагнітання, геометрії валків, зміни моменту та споживання енергії, надійності роботи. Можливості використання цих даних для формування тістової заготовки із необхідними, в умовах практики, формою і розмірами вивчено недостатньо. Тим більше для наших гвинтових валків нами встановлено, що формування тістового пласта з мінімальним ущільненням і збереженням формоутримуючих властивостей забезпечуються тільки при використанні поетапної розкати валками. Всі ці дані на сьогоднішній час вимагають результатів, так як відбулися зміни в процесі, властивостях компонентів та рецептурі.

На основі розроблених підходів для опису процесу нагнітання тіста в зазорі між новими валками, нами було використано гідродинамічну теорію каландрування псевдопластичної рідини. Це дозволило встановити кількісні залежності між геометричними характеристиками робочого простору (зазору) та властивостями тіста і режимами обробки [4, 9, 10, 12].

Закономірність зміни товщини шару тіста по ходу нагнітання між валками приведено на рис. 4.19. При розкачуванні гвинтовими валками циліндричної форми товщина тіста постійно змінюється в середній частині пласта, тобто в зоні захоплювання. На виході із валків – товщина однакова. Всі цикли розкачування валками криволінійної поверхні проходять без зміни зазору середньої частини валків від захоплення до захоплення. Це дозволяє стисненню і зсуву тіста здійснюватися плавно від його захоплення до центру розкачування 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_s і h_0 . Де: h_s – віддаль між поверхнями валків при наявності тіста; h_0 – мінімальний зазор між валками.

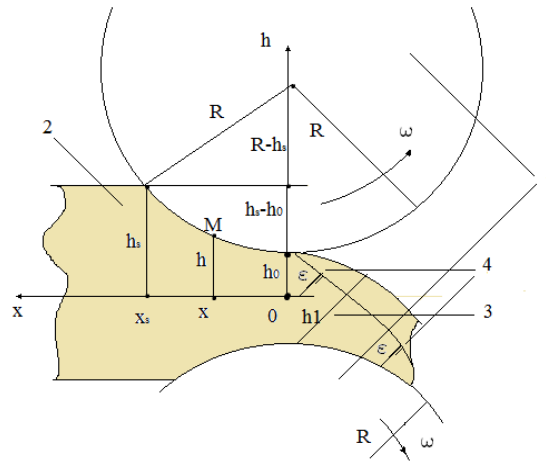


Рис. 4.20. Профіль схеми розкачування тіста між валками:

- 1 – обертові валки радіуса R , половинна відстань між якими h_0 ;
- 2 – потік тіста половинної товщини h на вході робочої камери;
- 3 – розкатане тісто після проходження валків

Умовні позначення (рис. 4.20): h_1, h – половина зазору на виході тіста і змінного зазору; x_1, x – відповідні абсциси; X_s – абсциса, що характеризує кількість завантаженого тіста; h_s – товщина шару; Δh – відносне стискання тіста в зазорі валків; P_{max} – питомий тиск тіста на валок; P – зусилля між валками; M – крутний момент; $N_{кор}$ – корисна потужність.

Позначимо через $U(x, y)$ – відповідну швидкість вздовж вісі OX , через V – складову швидкості вздовж осі OY . Загальна задача гідродинаміки в'язкої нестисливої рідини зводиться до рішення системи диференціальних рівнянь в яку входять: рівняння нерозривності, рівняння руху, рівняння енергії, реологічне рівняння.

Для визначення процесу, ми ввели наступні припущення: процес встановлений, ізотермічний, матеріал нестисливий і частково прилипає до поверхні валків. Це дозволило основним рівнянням прийняти вигляд [9, 12]:

$$\frac{dU}{dy} + \frac{dV}{dy} = 0; \quad (4.49)$$

$$\frac{d\tau}{dy} = \frac{dP}{dx}; \quad (4.50)$$

$$\tau = \mu \cdot \frac{dU}{dy} \left| \frac{dU}{dy} \right|^{m-1}. \quad (4.51)$$

Останнє рівняння (4.51) є модуль степеневого закону Оствальда, в якому знак дотичних напружень відповідає знаку швидкості зсуву. Записана система рівнянь вирішена при наступних граничних умовах:

- при $y=0$, $V=0$, $\frac{dU}{dy} = 0$ (симетрія потоку);
- при $y=h$, $U=\omega R$; (умови прилипання тіста на валки);
- при $x=x_1$, $P=0$;
- при $x=x_s$, $P=0$.

В результаті одержаний сумарний корисний момент опору має вигляд:

$$M = \mu \left(\frac{2m+1}{m} \right)^m \cdot \omega^m \cdot R^m \cdot L \int_{-x_1}^{x_s} \frac{(h_1-h) \cdot |h_1-h|^{m-1}}{h^{2m+1}} \cdot dx, \text{ Н*м.} \quad (4.52)$$

Корисна потужність:

$$N_{кор} = M_{заг} \cdot \omega, \text{ Вт} \quad (4.53)$$

Для розрахунку приймаємо із досліджень ефективні константи для тіста, що подається на обертові валки. Проведемо розрахунок для неперервного потоку. Реологічні константи – індекс течії m : 0,1 та в'язкість. Позначимо половинні зазори h_s на вході та h_1 на виході тіста, x та h біжучі координати точки на валку.

Під прогнозованими тріщинами та розтріскуванням на розкатаному потоці нижче критичної товщини ε розуміється неможливість тіста провести релаксаційні відновлення. Вираз (4.52) на практиці не може бути обчисленим чисельно, оскільки містить невласний інтеграл другого роду із особливістю у точці $x=0$. Тому для подальшого коректного дослідження проблеми виконаємо заміну, виходячи із геометричних побудов, що зображені на рис. 4.20 та властивостей кругових елементів обертових валків. Згідно побудови взаємодії поверхні валків з тістом, нами визначено параметр x (відстань від 0 до біжучої точки) та диференціал його зміни (4.51, 4.52).

$$x = \sqrt{\frac{(h-h_0)R}{2}}, \quad (4.54)$$

$$dx = \frac{\sqrt{2}}{4} * \sqrt{\frac{R}{h-h_0}}. \quad (4.55)$$

Крім того дослідним шляхом визначили найменшу товщину тіста, яка на виході з під валків не давала розриву в суцільному шарі. На основі даних досліджень не применшуючи загальності, таку величину приймемо за $\epsilon=0,01$.

Таким чином, корисний момент M опору валків буде обчислюватись як функціональна залежність половини товщини шару тіста на вході h_s та половини зазору між валками на виході h_1 . На основі визначених параметрів та схеми взаємодії валків з тістом проводимо обчислення по визначенню моментів, що діють на перших хвилинах взаємодії M_1 та моменту після виходу M_2 із валків. Корисний момент буде:

$$M_{zar}=M_1+M_2.. \quad (4.56)$$

Використовуючи програму (Math Cad-14) проведемо обчислення згідно наших даних.

$$M := \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \frac{\mu}{\rho} \cdot \left(\frac{2m+1}{m+1}\right)^m \omega^m \cdot R^m \cdot L \cdot \int_{\epsilon}^{hs} \frac{(h_1-h) \cdot (|h_1-h|)^{m-1}}{h^{2m+1}} \cdot \frac{R}{\sqrt{(h-h_0) \cdot R}} dh$$

$$MM := \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \frac{\mu}{\rho} \cdot \left(\frac{2m+1}{m+1}\right)^m \omega^m \cdot R^m \cdot L \cdot \int_{-h_1}^{-\epsilon} \frac{(h_1-h) \cdot (|h_1-h|)^{m-1}}{(|h|)^{2m+1}} \cdot \frac{R}{\sqrt{|h-h_0| \cdot R}} dh$$

По одержаному останньому рівнянню можна провести розрахунки корисної потужності:

$$N=(M_1+M_2)\omega, \quad (4.57)$$

та питомого тиску на валок

$$P = \frac{M_1 + M_2}{L} \quad (4.58)$$

Отримали графіки корисної потужності $N(H, m)$ та питомого тиску $P(H, m)$ на валки (рис. 4.21).

Зауважимо, що при збільшенні параметру індексу течії m до величини 0.75, графіки обох залежностей N та P мають практично незмінний характер відносно величини вхідного шару h_s на вході (рис. 4.22) [12, 13]. Відмінність полягає у збільшенні корисної потужності та питомого тиску. Видно, як чітко структурний стан розкатуючого тіста впливає на збільшення потужності в 1.5 рази та збільшення питомого тиску в 3.2 рази при дотриманні однакових геометричних параметрів процесу.

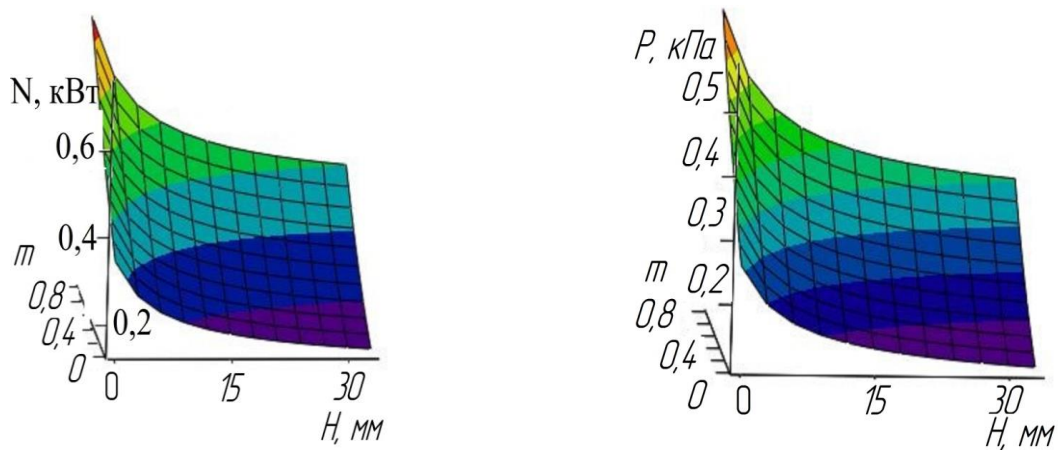


Рис. 4.21. Графіки поверхневих залежностей корисної потужності N та питомого тиску P на валок від параметра m , та зазору H

З даних графіків чітко видно, що при зростанні параметра H спочатку різко, а потім більш плавно знижується потужність (затрачена на нагнітання) та питомий тиск.

Використовуючи засоби математичної статистики, по базі даних проведених результатів експерименту, отримали методом найменших квадратів параметри рівнянь кривих поліноміальної регресії. Рівняння спрямовані для моделей залежностей N (кВт) та P (кН/м) другого і третього порядку. Вони забезпечують необхідну точність наближень для параметру ε відсутності розриву суцільного шару на виході розкатки.

Циклічна дія робочих органів на тісто спонукає до пружного відновлення і релаксації деформацій, що відбуваються одночасно з релаксацією напружень. При тихохідному нагнітанні тіста відбуваються відновлювальні деформації, а

відповідно пластична деформація незначна. Якщо тривалість пружного відновлення збігається з циклічністю дій робочих органів (механічних сил деформації), то на подолання релаксації деформації витрачається відчутна кількість енергії, яка затрачена на нагнітання (рис. 4.22, 4.23, 4.24)

На основі дослідних даних і рівнянь побудовано графічні залежності.

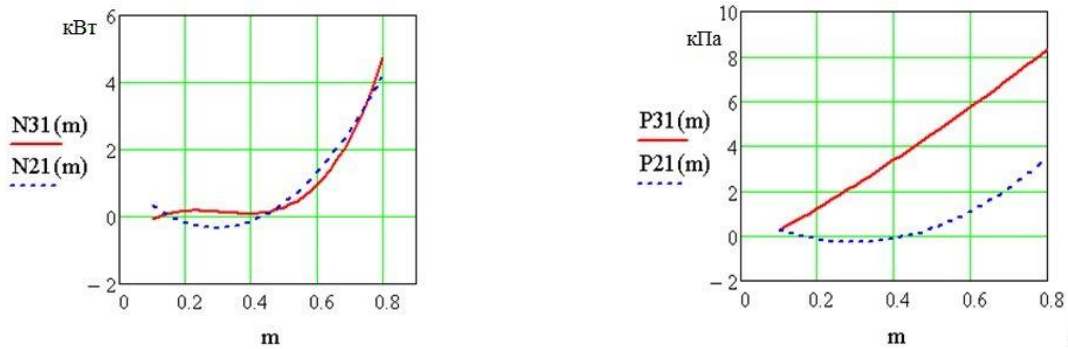


Рис. 4.22. Графіки залежностей корисної потужності N (кВт) та P (кН/м) від зазору $\epsilon=0,01$ при $0.1 \leq m \leq 0.8$

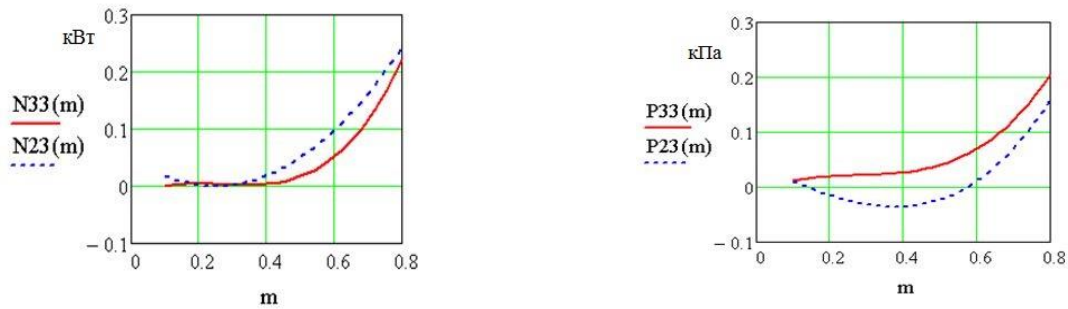


Рис. 4.23. Графіки залежностей корисної потужності N (кВт) та P (кН/м) від зазору $\epsilon=0,03$ при

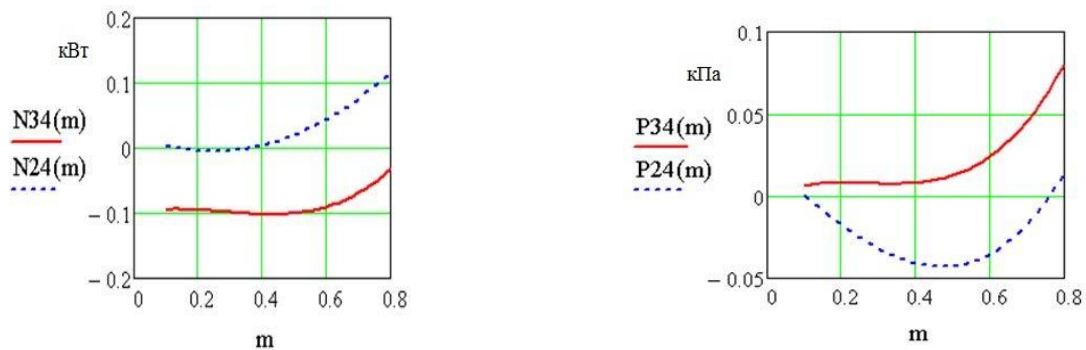


Рис. 4.24. Графіки залежностей корисної потужності N (кВт) та P (кН/м) від зазору $\epsilon=0,04$ при $0.1 \leq m \leq 0.8$

Із збільшенням зазору між валками, а значить, і швидкості деформації, зменшується опір деформаційних сил (відсутність релаксації) і збільшуються пластичні деформації. Тому ефективність використання енергії при нагнітанні тіста залежить не тільки від зазору (за витратами енергії), але від розподілу затрат на окремі процеси (рис. 4.22, 4.23). Такий підхід дає можливість визначити загальний показник якості розкатаного пласта тіста перед його формуванням на пристрої машини.

Аналіз результатів експериментів дозволив зробити висновок, що основними характеристиками машини для забезпечення необхідної і стабільної форми і розмірів виробу є реологічні показники. Дані реологічних показників оброблюваного тіста дають підхід до раціонального вирішення виконання технологічного процесу розкачування. Одночасно сприяють об'єктивним методам контролю якості та науково обґрунтованих режимів для проектування валків і робочих камер. Запропонований спосіб дозволяє не тільки одержати питомий тиск, але підібрати оптимальну форму зазору, при якому величина перепаду тиску буде постійною.

4.8. Визначення впливу параметрів нагнітання тіста на структуру готової бубличної продукції

Успішне вирішення поставлених багатогранних задач по якісному забезпеченні роботи формувальної машини Б-4–58 можливо на основі глибокого вивчення впливу валкових робочих органів на етапі формування виробів. В зв'язку з цим, поставлена задача визначення впливу різного роду параметрів на структуру готового виробу бублика «Подільського». Визначення і керування структурно – механічними властивостями тіста нам дозволяє одночасно змінювати основні показники і якісні характеристики виробів в параметрах встановлених норм.

Необхідно відзначити, що для забезпечення більш точної роботи формувальної машини велике значення має часткова відсутність включень газу в тісті. Тому необхідно замішане тісто зразу подавати на формування, а частково дозріле – піддавати механічній обробці (обминанню валками).

Відомо, що при обминанні та формуванні з подальшою термообробкою вуглекислий газ виходить з тіста в тій чи іншій мірі. Це викликає відповідні затрати вуглеводів та сухих речовин. Тому при проходженні технологічного процесу необхідно застосовувати правильну методику визначення необхідних параметрів.

До основних показників якості бубличних виробів можна віднести величину і структуру його пористості. Це обумовлює початкову густину і механічні характеристики тіста на стадії формування. Враховуючи основні фактори, що впливають на структуроутворення бублика, ми детально дослідили явища утворення пор і товщину їх стінок в період деформаційних процесів [13, 14]. Дослідження показали, що не зважаючи на відносно малу кількість дріжджів (1.2 кг), вже в перші хвилини відпочинку тіста після замішування за рахунок спиртового бродіння навколо дріжджових клітин появляються бульбашки вуглекислого газу. Вони постійно збільшуються із часом в об'ємі.

Дослідження проводились у двох напрямках: брався виріб з тіста після початкового формування (зразу після замішування) та виріб із кінцевої стадії формування (дозріле тісто піддавалося дискретним діям валка перед формуванням). Всі визначені показники зводилися в таблицю. Якість готового виробу зафіксували фотографією (рис. 4.25). Візуальне зображення підтверджує наші припущення про характер процесу та його можливі наслідки. Зовнішній вигляд виробів має різний колір забарвлення, глянцеvu поверхню та масу.

Практичні спостереження показали, що таке тісто має середню швидкість підймання від 2.3 до 8 мм/хв. Для другого взірця має меншу швидкість від 1.5 до 5 мм/хв тому колір, смак і аромат бублика в значній мірі залежить від даних показників, тобто, додержання процесу. Ці органолептичні показники мають досить вагоме значення для оцінки готової продукції. Так взірець 1 має приємний, рум'яний колір поверхні і характерний смак та аромат, що обумовлює гарне засвоєння бублика. Крім цього це відзначає, що технологічний процес виробництва бубликів пройшов без порушень при скороченому часі бродіння і своєчасному формуванні.

З аналізу процесу стискання тіста валками призводить до зменшення пор в об'ємі та пружної деформації часток. Тому в своїх дослідях ми не враховували тиск, а брали до уваги ті показники, які впливають в більшій мірі на газоутворюючу властивість (таблиця 4.8 і 4.9).

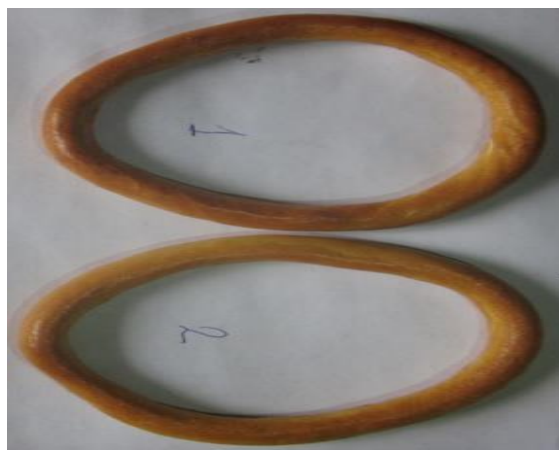


Рис. 4.25. Загальний вигляд бублика «подільського»:
1 – бублик без бродіння; 2 – бублик після тривалого часу бродіння

Приведені в таблицях показники, характеризують загальні технологічні якісні характеристики тістової заготовки та виробу. Вони дають можливість судити про додержання технологічного процесу для бублика «подільського». Оцінку структурних характеристик, зокрема пористості, здійснювали використовуючи розроблену методику [13]. Фотографування зразків проводили у відбитому світлі за допомогою мікроскопа XS-2610 MICROmed та фотоапарата OLYMPUS C-8080 з витримкою при фотографуванні $2 \pm 0,1$ с. Отримали світлини у форматі BMP, що дозволило збільшити в 10^3 разів при відповідній роздільній здатності (рис. 4.26). Оброблення світлин і обчислення геометричних характеристик ЗПШ проводили у інтерактивному режимі [14].

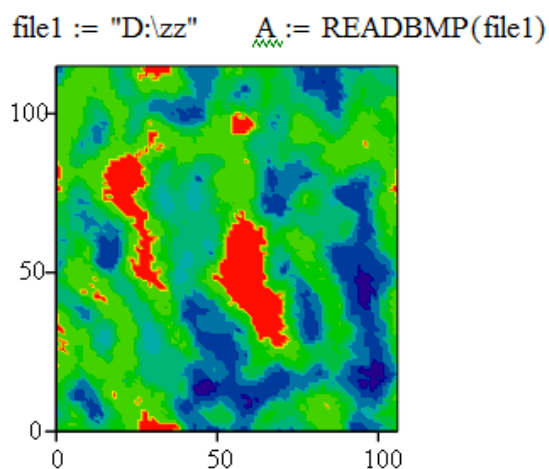


Рис. 4.26. Геометрична характеристика ЗПШ.

Таблиця 4.8

Технологічна характеристика напівфабрикату на початку роботи

№ з/п	n об/хв	m ₁ , кг	G, питома газоутворення	K ⁰	I, кількість розкатки	W, вологість	P, кг/м ³	m ₂ , кг
1	1.2	0.0099	10	1.57	0	31.6	1.12	0.0079
2	1.2	0.0097	10	1.6	0	31.6	1.115	0.0078
3	1.2	0.0095	10.8	1.76	0	31.6	1.1	0.0075

Отримані значення пористості двох різних готових виробів (рис. 4.26) формують масиви в. Крім того, перед випіканням бубликів, у дослідях першого та другого бублика робили заміри параметрів: m₁ – маса тістової заготовки до випікання, m₂ – маса бублика після остигання. При цьому отримували дефект маси $\Delta m = m_2 - m_1$, G – міра газоутворення, k – кислотність, ρ – густина. Масив в – характеристики пористості.



а)



б)

Рис. 4.26. Поверхня зрізу: а – першого зразка; б – другого зразка

Таблиця 4.9

Технологічна характеристика напівфабрикату на завершенні останнього завантаженого шматка тіста

№ з/п	n об/хв	m ₁ , кг	G, питома газоутворення	K ⁰	I, кількість розкатки	W, вологість	P, кг/м ³	m ₂ , кг
1	1.2	0.0098	20	2.157	4	31.6	1.08	0.0078
2	1.2	0.0095	23	2.226	5	31.6	1.07	0.0077
3	1.2	0.0094	27	2.35	5	31.6	1.03	0.0075

Відшукаємо параметри лінійної регресії b_1 (dm , G , k , ρ) для першого бублика, використовуючи програму MathCad. Із отриманих значень параметрів видно, що значимими є не всі, а лише a_1 та a_2 . Аналогічно до попереднього, відшукаємо параметри лінійної регресії b_2 (dm , G , k , ρ) для другого бублика.

Обробка експериментальних даних дозволила встановити залежність між поверхнею пор та масою тістової заготовки і виробу, густиною, кислотністю (див. додатки Ж, З). Залежність в першому наближенні має лінійний характер, що описується рівнянням:

$$b = a_1 dm + a_2 G + a_3 K + a_4 \rho + a_5$$

Для першого зразка: $b = 1.104dm - 0.177G + K - 0.087\rho$.

Для другого зразка: $b = 0.519dm + 8.422 \cdot 10^{-3}G - 0.449K$.

Очевидним із додатків для побудови діаграм пористості (див. додаток) заготовок тіста перед випіканням двох зразків бубликів, необхідно використовувати лише значимі параметри у рівняннях регресії.

Розглядаючи процес утворення пор в динаміці формування виробу, нами встановлено, що їх товщина встановлюється і постійно змінюється за технологічний цикл. Утворення пор в основному проходить в таких напрямках:

- напруження від сил поверхневого натягу розділу фаз тісто – газ, що надають порі сферичну форму і обумовлюють тиск газу всередині;
 - напруження за рахунок різниці питомої маси газу і тіста, по закону Архімеда;
 - напруження із-за постійного газоутворення та дії обминання тіста.
- Аналізуючи поняття про високу якість, можна сформулювати наступні положення:

- поверхня бублика повинна бути глянцева, мати добре розрихлену однорідну структуру, характеристикою якої є величина пористості;
- поверхня бублика повинна мати колір, характерний для кожного виробу;
- смак і аромат повинні відповідати еталонам для кожного виробу і контролюватися не тільки органолептичними, але і фізико – хімічними властивостями (показниками);
- величина виходу тіста і продукту повинні відповідати встановленим технологічним інструкціям.

Висновки. Одним із шляхів зменшення собівартості продукції є оптимізація апаратурної реалізації виробництв з енергетичної точки зору, тобто забезпечення повної відповідності режимів обробки з дотриманням структурно-механічних властивостей в'язкого тіста.

Відзначено, що у більшості випадків в дослідженнях не враховувались втрати енергії фізико-хімічних зв'язків при визначенні оптимальних параметрів процесу. Вибір певних технологічних параметрів оцінюється з точки зору збільшення виходу кінцевого продукту, а комплексне порівняння різних технологічних схем з енергетичної точки зору проведено не було.

Відзначко, що одним з факторів, який характеризує процес часткового перетворення тіста 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. Відповідно розглянуто:

- аналіз теплофізичних процесів при дії обертових валків на тісто;
- дана оцінка енергетичних ресурсів і розробка пропозицій щодо їх зменшення;
- удосконалено апаратурне виконання технологій пов'язаних з суміщенням в часі процесів: затягування, розкачування, стискання та нагнітання;
- визначено фактори, які впливають на температурні потоки на основі термодинамічної моделі робочого процесу формувальної машини;
- проведено теоретичне дослідження температурних потоків;
- виконано експериментальні дослідження температурних потоків.

Список використаної літератури

1. Енергетичні трансформації і енергозбереження в харчових технологіях: монографія / А. І. Соколенко, А. А. Мазаракі, В. А. Піддубний та ін. К. : Фенікс, 2012. 484 с.
2. Казаков Е. Д., Кретович В. Л. Биохимия зерна и продуктов его переработки. М. : Агропромиздат, 1989. 367 с.
3. Козін В. М., Арсеньєв В. М., Левченко Д. О., Мелейчук С. С. Термомеханічний розрахунок рідинно-кільцевих компресорних машин : монографія. Суми : Сумський державний університет, 2014. 158 с.
4. Деркач А., Стадник І, Василів В. Застосування експериментально-статистичного моделювання для досліджень параметрів надійності валкових машин. Сборник научных трудов РИНЦ SWorld. Мир науки и инноваций. Выпуск № 1 (3), 2016. С. 6–66.

5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Стадник І., Деркач А., Василів В. Методика розрахунку енергетичних параметрів валкової тісторозкаточної машини. *Научные труды SWorld*.- 2016. № 2 (2). Том 3. С. 69–73.
9. Стадник І., Деркач А., Василів В. Застосування експериментально-статистичного моделювання для дослідження параметрів надійності валкових машин. *Научные труды SWorld*. 2016. № 2 (2). Том 3. С. 63–66.
10. Стадник І., Деркач А., Василів В. Визначення потужності валкової тісторозкаточної машини. *Знание*. 2016. № 3–2. С. 36–41.
11. Drozdziel P., Derkach A., Stadnyk I., Vitenko T. 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.

РОЗДІЛ 5

МЕХАНІЗМИ ФОРМУВАННЯ МІКРОБНИХ БІОПЛІВОК НА ПОВЕРХНІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Ключовим завданням харчової галузі є виробництво достатньої кількості безпечних та якісних борошняних продуктів. Основний чинник, який знижує терміни зберігання і безпечність продуктів, – це мікроорганізми. Кількісний і якісний склад мікрофлори продуктів залежить від дотримання гігієнічних умов виробництва та ефективної санітарної обробки технологічного обладнання. Згідно даних ВООЗ, найбільш суттєвим джерелом мікробного забруднення харчових продуктів під час виробництва є технологічне обладнання. Близько 40% харчових отруєнь людей у світі викликаються мікроорганізмами, які надходять у сировину та готові продукти з технологічного обладнання. В основному мікрофлора виживає на поверхнях обладнання під час санобробки у так званих «мертвих зонах» (згини, з'єднання, прокладки, клапани, тріщини, подряпини) за рахунок формування біоплівки. На обладнанні, де виявлено хоча б одну планктонну бактерію, там є близько 1000 мікроорганізмів, сформованих у біоплівки. У зв'язку з цим до поверхні технологічного обладнання, яке використовується в харчовій промисловості ставляться певні гігієнічні вимоги, особливо щодо санітарної обробки, рельєфу та шорсткості. Згідно Директиви ЄС 93/43 за критеріями оцінки гігієнічності обладнання, великі ділянки поверхні, які контактують з продуктом, повинні мати шорсткість, що не перевищує 0,8 мкм. Так як, шорсткість поверхні може сприяти або перешкоджати адгезії і розмноженню біоплівкових форм бактерій. Крім того, розвиток біоплівки сприяє зниженню ефективності санітарної обробки технологічного обладнання і тим самим підвищує мікробне забруднення продуктів та скорочує терміни їх придатності.

Отже, проведення досліджень з вивчення процесу формування біоплівок бактеріями, які мають різні морфологічні і фізіологічні властивості, залежно від призначення технологічного і допоміжного обладнання з відповідною шорсткістю поверхні нержавіючої сталі є актуальними у промисловості. Дослідження у такому напрямку дозволять визначити та науково обґрунтувати параметри санітарної обробки технологічного обладнання, спрямованих на максимальне зниження процесу мікробної адгезії, і є спрямованим підґрунтям на ефективну деградацію біоплівок та випуск якісної продукції.

5.1. Теоретичні аспекти мікробної адгезії до поверхні

Вважається, що адгезія бактерій до поверхні – це складний фізико-хімічний процес, який залежить від: властивостей поверхні, таких як топографія, шорсткість, гідрофобність, хімічний склад та поверхнева енергія; початкової кількості мікроорганізмів, їх розмірів, температури і рН навколишнього середовища тощо [1, 2, 3, 4]. Проте, серед багатьох наведених чинників, які впливають на процес адгезії, дослідники [4, 5] вважають, що властивості поверхні відіграють основну роль. Внаслідок чого було запропоновано три теорії мікробної адгезії до поверхні: термодинамічна, DLVO (Deryaguin-Landau-Verwey-Overbeek) теорія та теорія розширеного XDLVO [1, 6, 7].

Термодинамічна теорія ґрунтується на тому, що при прикріпленні мікроорганізмів до поверхні відбувається зміна загальної вільної енергії Гіббса (енергія, яка визначається в закритій системі). Розраховується дана енергія за рівнянням Ліфшицу-Ван дер Ваальса і кислотно основних взаємодіях Люїса [1].

$$\Delta G_{ADH} = \Delta G_{LW} + \Delta G_{AB}, \quad (5.1)$$

де ΔG_{ADH} – зміна загальної вільної енергії Гіббса, що приймає участь в адгезії; ΔG_{LW} – зміна загальної вільної енергії Гіббса та сил Ліфшица-Ван дер Ваальса; ΔG_{AB} – зміна вільної енергії кислотно основних сил Люїса.

Термодинамічна теорія припускає, що адгезія мікроорганізмів завжди зворотній і незалежний від відстані процес. Дана теорія не визначає впливу поверхневого заряду і концентрації електролітів навколишнього середовища. Вважається, що дана теорія найбільш точна при роботі з незарядженими поверхнями або при наявності в середовищі великої кількості електролітів [1].

Теорія DLVO ґрунтується на термодинамічній теорії, а також припускає, що адгезія являється сумою між фазних енергій. Дана теорія вважає, що колоїдні частинки ліофобної дисперсної системи можуть безперешкодно зближуватися одна з одною, доки не відбудеться контакт їхніх рідких дифузних оболонок.

$$U^{DLVO} = U^{LW} + U^{EL}, \quad (5.2)$$

де U^{DLVO} – повна енергія взаємодій;
 U^{LW} – енергія сил Ліфшица-Ван дер Ваальса;
 U^{EL} – електростатична енергія взаємодій.

Теорія припускає, що адгезія може бути зворотною і залежить від відстані. Вона є найбільш точною, коли електростатичні сили переважають, проте вона обмежена у випадку ігнорування ефекту полярних взаємодій [1].

З метою більш точного моделювання мікробної адгезії була запропонована теорія XDLVO, яка ґрунтується на термодинамічній і DLVO теорії [1]. Згідно цієї моделі вважається, що адгезія являється сумою сил Ліфшица-Ван дер Ваальса, електростатичних та вільної енергії кислотно основних сил Люїса.

$$U^{DLVO} = U^{LW} + U^{EL} + U^{AB}, \quad (5.3)$$

де U^{DLVO} – повна енергія взаємодій;
 U^{LW} – енергія сил Ліфшица-Ван дер Ваальса;
 U^{EL} – електростатична енергія взаємодій;
 U^{AB} – енергія кислотно основних сил Люїса.

Як у випадку з DLVO теорією, XDLVO модель вважає, що адгезія може бути зворотною і залежить від відстані.

Проте, дослідники [1, 6] вважають, що всі три теоретичні моделі, які мають на меті розкрити суть мікробної адгезії до поверхні розроблені для ідеальної колоїдної системи. У виробничих умовах мікробна адгезія набагато складніший процес і прикріплення мікроорганізмів може відбуватися по різному [1, 6]. Тому багато вчених вважають, що процес мікробної адгезії до поверхні на практиці часто відрізняється від вище описаних теорій [6, 8]. Це пов'язано з тим, що поверхні твердих матеріалів піддаються впливу різних середовищ, адсорбують на собі органічні і неорганічні речовини, утворюючи таким чином кондиціонуючий шар, до якого приходить прикріплення мікроорганізмів [8]. У подальшому сформований кондиціонуючий шар змінює фізико-хімічні властивості поверхні, і таким чином впливає на процес мікробної адгезії. У дослідженнях [8, 9, 10] вказується, що адгезія мікроорганізмів до твердих поверхонь є двофазним процесом, який складається із вихідної зворотної (фізичної) і наступної незворотної (молекулярної або клітинної) фази. Також

вважається, що мікробна адгезія до твердої поверхні може бути пасивна або активна, що залежить від рухливості мікроорганізмів та транспорту клітин бактерій на основі гравітації, дифузії чи за допомогою гідродинамічних сил [8, 11]. Крім цього на процес адгезії впливають фізико-хімічні властивості клітин мікроорганізмів, фаза їх росту та наявність поживних речовин [11, 12, 13]. Вважається, що мікробна адгезія до поверхні проходить швидко, упродовж декількох секунд [5, 14]. Планктонні мікробні клітини транспортуються від суспензії до кондиціонуючої поверхні за допомогою різних фізичних сил і тим самим забезпечується початкова зворотна адгезія [10, 11, 15]. На цій стадії адгезії мікроорганізми ще демонструють броунівський рух і можуть бути легко видалені з поверхні [10, 11].

Після початкової зворотної адгезії мікробні клітини поступово прикріплюються не зворотно і на цій стадії молекулярні реакції між мікробними поверхневими структурами і поверхнею субстрату стають домінуючими. На відміну від зворотної адгезії, тут задіяні різні сили близької взаємодії, такі як диполь-диполь взаємодія, водневий, іонний і ковалентні зв'язки [9, 10, 11, 15]. На даному етапі мікробної адгезії необхідно докласти різні хімічні чи фізичні сили для видалення мікроорганізмів з поверхні.

Отже, з оглянутих даних літератури видно, що теорії прикріплення мікроорганізмів до поверхні враховують переважно фізико-хімічні аспекти поверхні матеріалів, а у меншій мірі звертають увагу на морфологічні і фізіологічні особливості бактерій.

5.2. Поняття про мікробну біоплівку, стадії формування біоплівок на технологічному обладнанні

Не зворотно адгезовані мікробні клітини до поверхні починають розвиватися і рости утворюючи мікроколонії, які формують у подальшому біоплівку [16, 17]. Біоплівка – це мікробне угруповання, яке формується з клітин, адгезованих до абіогенної поверхні або одна до одної, знаходячись в матриксі продукованих позаклітинних речовин [18, 19]. Матрикс або позаклітинна полімерна субстанція – це продукований мікроорганізмами, що формують біоплівку, комплекс біологічних полімерів (полісахариди, пептиди, нуклеїнові кислоти, екзоферменти та інші речовини), який захищає бактерії від чинників навколишнього середовища (зміна рН, температурного чинника, дії мийних і дезінфікуючих засобів тощо) [2, 7, 6,17]. Матрикс біоплівки розділений каналами, які заповнені рідкою фазою (вода), а також пронизаний порожнинами

та пустотами. Через систему каналів транспортуються поживні речовини та відбувається доставка кисню від верхніх (зовнішніх) до внутрішніх складових біоплівки, одночасно з киснем виводяться бактеріальні метаболіти [2, 3, 17]. Матрикс біоплівки здатний знижувати швидкість дифузії деяких антибіотиків і дезінфектантів. Ці властивості залежать від біохімічного складу та метаболічної активності бактерій у біоплівці [17, 18, 22]. Хімічна будова синтезованого екзополімерного матриксу біоплівки неоднорідна і його складові компоненти відрізняються у різних родів та видів мікроорганізмів [16, 18, 19]. Водночас екстра целюлярний шар біоплівки містить полісахариди (декстрин, целюлоза, гіалуронова кислота, тощо), дані речовини представлені у найбільшій кількості, приблизно в 45–97% [17, 18]. Відсотковий вміст інших хімічних речовин може значно відрізнятися, що залежить від роду та середовища існування мікроорганізмів. Уміст білкових речовин може досягати до 65%, а жирів – до 45%, нуклеїнових кислот – до 20% [16, 17]. Дані сполуки перебувають у гідратованому стані, оскільки 80–90% об'єму біоплівки займає вода. Згідно досліджень М. Augustin та ін. [6, 5] у різних родів і видів мікроорганізмів через неоднорідність екзополісахаридно-пептидного складу матрикс біоплівок буває полісахаридний, у якому переважають вуглеводи, білковий – пептиди та змішаний. Так, за даними досліджень Р. Speziale та ін. [6, 7] основним компонентом матриксу біоплівки золотистого стафілококу є полісахаридний міжклітинний адгезин. У біоплівок мікроорганізмів роду *Bacillus* переважають білки [6, 7]. У той же час дані досліджень вказують [8], що склад матриксу біоплівки залежить також від середовища в якому росте (існує) мікроорганізм, і в одного і того ж виду він може відрізнятися. Якщо біоплівка складається із декількох родів або видів мікроорганізмів, то екзометаболіти (побічні продукти життєдіяльності) одного виду мікроорганізму можуть використовуватися для забезпечення росту і розвитку іншого виду. При цьому бактерії одного виду забезпечують своїми лігандами адгезію інших видів бактерій [69]. Наприклад, на переробних підприємствах технологічне устаткування може бути контаміноване умовно-патогенними мікроорганізмами (*Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Yersinia enterocolitica*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas spp.*, *Bacillus cereus* і ін.). Встановлено, що екзополімерний матрикс біоплівки *Pseudomonas fragi* сприяє прикріпленню і утворенню біоплівки *Listeria monocytogenes* [7]. Однак, може бути й інша ситуація, коли мікроорганізми, які перші колонізували поверхню в процесі конкуренції за субстрати, продукують побічні токсичні продукти життєдіяльності, що сприяють формуванню тільки монобіоплівки [7, 17].

Кожен вид мікроорганізмів має свої особливості розвитку та росту біоплівки, хоча механізм формування їх має загальні закономірності та тенденції [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Основним моментом без якого не можливе утворення біоплівки є процес адгезії мікроорганізмів до поверхні [16, 17, 18, 19, 20].

Вчені виділяють п'ять основних стадій формування і розвитку біоплівки, на будь якій поверхні [20, 21]. На рис. 1.1 наведено схематичну модель формування і росту біоплівки [4, 22].

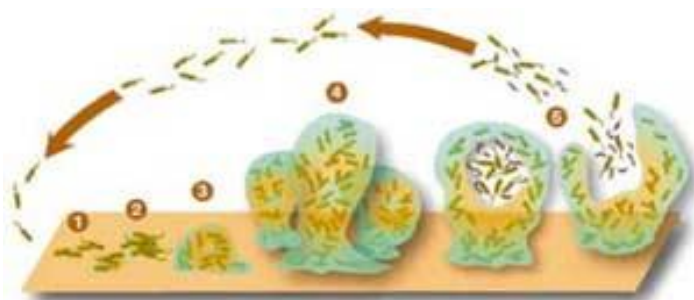


Рис. 5.1. Гіпотетична модель формування мікробної біоплівки:
стадія 1 – це адгезія бактерій до поверхні; 2–4 стадія – ріст колоній і
продукування міжклітинного матриксу, формування біоплівки;
5 – дисперсія (вихід планктонних бактерій із біоплівки)

На першому етапі між поверхнею і мікроорганізмами виникає процес адгезії. На цьому етапі цей процес є зворотнім. На другому – четвертому етапах проходить формування біоплівки [11, 12, 14]. Мікроорганізми починають інтенсивно розмножуватися і активно продукувати багатоклітинні компоненти екзополімерного матриксу. Це один із основних етапів формування мікробної біоплівки [14]. Проте ріст будь-якої мікробної біоплівки залежить від наявності поживних речовин в навколишньому середовищі, доступності їх до клітин, які знаходяться в середині біоплівки, а також можливість видалення продуктів метаболізму. Коли біоплівка досягає динамічної рівноваги розвитку і критичної маси, частина мікробних клітин, які найбільш близькі до адгезивної поверхні, гинуть через недостачу поживних речовин, зміни рН, кисню, а інша частина бактерій залишається в нерухомому стані [9].

На п'ятому етапі найглибші шари біоплівки, які віддалені від колонізованої поверхні, починають продукувати планктонні клітини, які залишають біоплівку і колонізують інші поверхні [7, 16, 15]. Дані (старі) біоплівки дуже важко видалити з поверхні. Основна небезпека від біоплівок на обладнанні, полягає в тому, що позаклітинний матрикс біоплівки захищає бактерії від дії

дезінфікуючих засобів. Мікроорганізми, які вижили, колонізують нові поверхні та молочні продукти [6, 12, 13].

Отже, з оглянутих літературних джерел випливає, що існують певні особливості формування біоплівки у різних видів бактерій, хоча загальні закономірності процесу плівкоутворення являються тривіальними.

5.3. Чинники, які впливають на мікробну адгезію та формування біоплівки на технологічному обладнанні в харчовій промисловості

Як згадувалося вище мікробна адгезія є складним біологічним процесом, на який впливають фізіологічні особливості мікроорганізмів, властивості навколишнього середовища та фізико-хімічні властивості поверхні [7, 8, 9, 18]. Проте, основні чинники, які впливають на адгезію мікроорганізмів до поверхні технологічного обладнання в харчовій промисловості це такі:

- вид бактерій (не всі мікроорганізми мають однакову здатність до адгезії) [11, 12];
- фізичні і хімічні властивостей поверхні (шорсткість, хімічний склад, поверхнева вільна енергія, гідрофільність чи гідрофобність матеріалу) [13, 14, 15, 16, 17];
- екологічні параметри (осмолярність, рН, температура, парціальний тиск кисню, наявність антимікробних речовин і т. д.) [18, 19, 22].

Результати досліджень вказують [20], що поживні речовини для мікроорганізмів біоплівки містяться у розчині, тому склад поживного середовища, його іонна енергія, рН, температура також впливають на інтенсивність адгезії мікроорганізмів до основи. У глибині сформована біоплівка складається з неоднорідної будови, внаслідок чого існує газовий градієнт концентрації, зокрема зменшення кількості кисню від периферії в глибину), градієнти рН і поживних речовин. Такі градієнти функціонування біоплівки забезпечують фізіологічну варіабельність між індивідуальними клітинами біоплівки – в глибині клітини ростуть повільніше, ніж на периферії плівки, що призводить до фенотипічної стійкості до різкої зміни чинників навколишнього середовища.

Під час зростання іонної концентрації розчину за рахунок внесення додаткової кількості катіонів натрію, калію, кальцію можлива зміна міцності адгезованих клітини до поверхні за рахунок зміни заряду на поверхні клітин. Це призводить до збільшення або зменшення електростатичного бар'єра під час адгезії бактерій до поверхні [16]. При коливаннях окисно-відновного потенціалу

середовища відбувається зміна заряду на поверхні клітин, що може спричинити відмирання клітин або порушення їх метаболізму, що також впливає на формування щільних структурованих біоплівки [13]. На видовий склад сформованих біоплівки і їх щільність впливає наявність ланцюгів живлення, коли продукти метаболізму одного роду чи виду є поживними субстратами для іншого [11]. Також на формування і розвиток біоплівки впливає рівномірне надходження поживних речовин у кількості, достатній для розвитку та розмноження [12]. На формування біоплівки та міцність її адгезії до поверхні впливають гідрофобні властивості поверхні мікроорганізмів, наявність на ній ворсинок і джгутиків. Більшість бактерій мають негативно заряджену поверхню, в якій містяться гідрофобні зовнішні компоненти, за рахунок яких відбувається гідрофобна взаємодія з основою. Присутність на поверхні біоплівки полісахаридів або протеїнів, допомагає бактеріям адгезуватись до поверхні, тим самим забезпечувати конкурентну перевагу у формуванні біоплівки для певних клітин мікробної асоціації [14]. Крім того, на структуру біоплівки впливає присутність в її складі мікроорганізмів, які в процесі свого росту і розвитку вивільняють газові речовини метаболізму. Це призводить до зменшення щільності біоплівки та нерівномірного надходження живильних субстратів [13, 14, 15].

5.3.1. Вплив температури на формування мікробних біоплівки

Дослідники [20, 21] встановили вплив температури на іммобілізацію мікроорганізмів і щільність формування біоплівки. Було показано, що зниження та підвищення температури вище оптимальних значень негативно позначаються на життєдіяльності мікроорганізмів у біоплівці. Згідно досліджень Bonaventura G. D. та інших [17], адгезія штамами *Listeria monocytogenes* до скляної поверхні відбувалася значно краще за температури +4, +12 та +22°C, ніж на полістироловій поверхні та на нержавіючій сталі. Водночас за температури +37°C *Listeria monocytogenes* формувала щільнішу біоплівку на нержавіючій сталі та склі, порівняно з полістиролом. Це дає підставу вважати, що гідрофобність була значно вища за температури 37 °C, ніж при +4, +12 та +22°C. Ймовірно підвищена температура модифікує гідрофобність поверхні клітин та сприяє інтенсивнішому формуванню мікробних біоплівки на поверхні.

У дослідженнях [24] показано, що за температури +12 °C штами *Staphylococcus aureus*, які виділені з технологічного обладнання на молокопереробних підприємствах продукували біоплівки. При цьому рівень гідрофобності клітинної поверхні бактерій збільшувався з підвищенням

температури. Крім того, статистично значуща різниця ($P < 0,001$) виявлено між гідрофобністю при 37°C та 12°C . Практично аналогічні дані і отримали інші дослідники [25] при визначенні процесу адгезії і плівкоутворення у *Staphylococcus aureus* за температури 7 та 28°C . За їхніми даними за температури 7°C процес формування біоплівки збільшувався до трьох діб, порівняно з 28°C – одна доба.

Найбільш активно формували біоплівку за температури $4-6^{\circ}\text{C}$ такі види псевдомонад, як *Pseudomonas fluorescens* та *Pseudomonas putida*. У середньому 95% цих штамів утворювали біоплівку з оптичною щільністю $1,43 \pm 0,11$ од. За цих умов, кількість штамів бактерій роду *Alcaligenes* та *Acinetobacter*, які формували біоплівку складала 87,5–73,7% із щільністю $1,01 \pm 0,100$ од. Кількість культур, які формували біоплівку за температури 15°C , порівняно з температурою $4-6^{\circ}\text{C}$ була більшою і становила від 84,5 до 100%. Найменше формували біоплівку психротрофи за температури 30°C – від 4,2 до 18,5%. При цьому щільність біоплівок за температури 30°C була в 1,7–3,4 раза меншою, порівняно з щільністю біоплівок за температури 15°C . Автори [19, 20] вважають, що мікроорганізми можуть довго перебувати в навколишньому середовищі на деталях технологічного устаткування та інвентаря і відігравати важливу роль в контамінації продуктів. У той же час, наявність у молоці сирому мікроорганізмів з високою щільністю утворених біоплівок за температури $4-6^{\circ}\text{C}$ зберігання, можна розглядати, як фактор контамінації технологічного устаткування молокопереробних підприємств.

Отже, на процес адгезії і формування біоплівок на технологічному обладнанні у промисловості значний вплив має температура навколишнього середовища.

5.3.2 Вплив рН середовища на формування мікробних біоплівок

Мікрофлора технологічного устаткування на переробних підприємствах зазнає впливу лужного та кислого середовищ, коли проводять санітарну обробку лужними та кислотними мийно-дезінфікуючими засобами. Дослідниками встановлено, що рН навколишнього середовища є важливим фактором, який впливає на зниження мікробної адгезії до поверхні об'єкта та формування біоплівки [21, 22, 23]. У дослідженнях проведених з мікроорганізмами, виділених з доїльного устаткування та молока сирого, вчені [13] виявили, що бактерії роду *Enterococcus* формували біоплівки високої щільності за величини рН середовища від 4,0 до 9,0. У кислому середовищі (рН 4,0) бактерії видів *Streptococcus spp.*, *Micrococcus spp.*, *Staphylococcus spp.* і *Escherichia coli*

формували біоплівки в 1,3–3,0 раза нижчої щільності, порівняно з рН середовища 7,0 од. Водночас, за рН середовища 9,0 дані види мікроорганізмів не формували біоплівки високої щільності. Зовсім інша тенденція спостерігалася у формуванні біоплівок психротрофними мікроорганізмами за різних величин рН середовища. При рН 4,0 од психротрофні бактерії та синьогнійна паличка не формували біоплівки взагалі, а збільшення величини рН до 9,0 од призводило до збільшення у 1,2–3,5 раза кількості біоплівок середньої щільності. Дослідники зробили висновки, що рН середовища беззаперечно впливає на процес формування біоплівок бактеріями. При цьому, формування біоплівок бактеріями в кислому середовищі слабше, ніж в лужному, а застосування для санітарної обробки розчинів з певним рН може є ефективним способом для запобігання формуванню мікробних біоплівок. Тому на поверхнях валків проходить слабше у тих випадках, коли обладнання простоє і не пройшло достатню обробку.

5.3.3. Аналіз шорсткості та чистоти поверхні

Дані наукової літератури [3, 11] вказують, що при вивченні мікробної адгезії необхідно підходити комплексно і враховувати поряд з шорсткістю топографію поверхні, так як ці величини є взаємозалежні. Вважається, що шорсткість поверхні відноситься до двовимірного параметру поверхні матеріалу і зазвичай описується як середня арифметична шорсткість (R_a) та середня квадратична шорсткість (R_q) [3, 4]. У той же час, топографія має трьох мірні параметри і описує елементи форми поверхні [4]. Тому при вивченні мікробної адгезії звертають увагу на шорсткість поверхні та параметри топографії [3, 91]. Отже, виходячи з цього процес мікробної адгезії тісно пов'язаний із амплітудними параметрами поверхні (шорсткість) та її просторовими змінами, які характеризуються морфологічними особливостями поверхні (топографія).

У харчовій промисловості найчастіше використовують для обладнання і устаткування нержавіючі корозійно-стійкі сталі наступних марок та їх вітчизняні аналоги AISI-304 (аналог 08X18H10), AISI-316 (аналог 03X16H15M3), AISI-321 (аналог 08X18H10T) [12, 13]. Наведені марки нержавіючої сталі в стані поставки можуть мати шорсткість поверхні, яка коливається в межах від 0,2 до 3,2 мкм. Відповідно, до критерію оцінки гігієнічності обладнання [9, 10], великі ділянки поверхні, які контактують з продуктом, повинні мати шорсткість, що не перевищує 0,8 мкм. Дослідження з вивчення впливу рельєфу та шорсткості поверхні на мікробну адгезію досить не однозначні. Так згідно даних [14, 15, 16, 17, 18] існує кореляція між шорсткістю поверхні та бактеріальною адгезією, при чому прикріплення мікроорганізмів до поверхні збільшувалося із зростанням

шорсткості. У дослідженнях [19] встановлено, що формування біоплівки проходило набагато повільніше на поверхні нержавіючої сталі марки AISI-316 з шорсткістю до 0,4 мкм, порівняно з шорсткістю більшою 0,8 мкм.

За допомогою електронної мікроскопії дослідники [20, 21, 24] виявили, що первинна адгезія у штамів (*Desulfovibrio desulfuricans*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas putida* та *Rhodococcus spp.*) відбувається на поверхні нержавіючої сталі AISI-304 вздовж западин шорсткості, оскільки за таких умов збільшується площа контакту мікробної клітини з поверхнею. Водночас, на поверхнях даної сталі, але з дуже значною шорсткістю більше 30 мкм прикріплення мікроорганізмів проходить випадково. Проте, інші дослідження вказують [84, 92, 93, 103, 104], що між шорсткістю поверхні нержавіючої сталі та мікробною адгезією практично відсутній кореляційний зв'язок в межах шорсткості від 0,01 до 3,3 мкм. Так, у дослідженнях [15, 16, 17] проведених на нержавіючій сталі AISI-304, AISI-316 з модельними штамами *Listeria monocytogenes* та *Staphylococcus aureus* встановлено, що клітини бактерій не розміщуються виключно вздовж поверхні полірування, а мікроорганізми колонізують поверхню хаотично.

Повідомляється [13, 18], що зношення поверхні нержавіючої сталі в харчовій промисловості може змінити шорсткість, яка погіршує процес миття і тим самим підвищити мікробну адгезію. У зношених потертостях нержавіючої сталі накопичуються органічні речовини, які збільшують площу поверхні для контакту мікроорганізмів, а також є добрим поживним середовищем для їх розвитку. Результати досліджень виявили, що зношена поверхня з шорсткістю менше 0,8 мкм незначно впливала на процес адгезії штамами *Pseudomonas aeruginosa* і *Staphylococcus aureus*, однак впливала на забруднення органічними речовинами [18]. Також виявлено, що сформовані біоплівки на поверхнях з великою шорсткістю знижували ефективність теплопередачі у теплообмінниках-конденсатору, приблизно на 15% [19].

Отже, суперечливі дані отримані науковцями, щодо впливу шорсткості поверхні нержавіючої сталі на процес адгезії мікроорганізмів, очевидно пов'язані із за проведення експериментів у різних умовах з використання різних родів і видів мікроорганізмів, матеріалів та методів дослідження. Однак науковці прийшли до єдиної думки, що такі елементи топографії поверхні, як подряпини, щілини, ямки, виступи, тріщини відіграють важливу роль в процесі адгезії і формування біоплівки мікроорганізмами [3, 4, 5, 20, 26, 27].

Здатність до очищення поверхні залежить від застосованої технології обробки поверхні. Відомо, що нержавіючі сталі за методом обробки поверхні

холодна прокатка мають шорсткість 0,2–0,5 мкм, тому не потребують полірування, щоб відповідати вимогам щодо шорсткості, якщо поверхня не має ямок, щілин та інших нерівностей після чистової обробки [11, 12].

Відношення між технологічною поверхневою обробкою нержавіючої сталі та станом поверхні після даної обробки наведено в табл. 5.1. З даних табл. 5.1 видно, що для отримання поверхні відповідної шорсткості необхідно застосовувати певний метод обробки сталі. Для харчової нержавіючої сталі, яка має мати шорсткість поверхні не більше 0,8 мкм найкраще підходять такі методи обробки, як холодно катана, відпал, травлення, електрополірування та механічне полірування певним номером.

Таблиця 5.1

Приклади методів обробки поверхні нержавіючої сталі та її шорсткості за даними [99, 100, 102]

Методи обробки поверхні	Шорсткість поверхні, мкм	Типові характеристики технологій обробки
Холодно катана нержавіюча сталь	0,2–0,5	Гладенька суцільна поверхня
Гарячо катана нержавіюча сталь	>4	Суцільна поверхня
Піскоструйна обробка скляними кульками	1,0–1,2	Порушення суцільності поверхні
Мікронаклеп	<1	Деформована (посічена) поверхня
Відпал	0,4–1,2	Наявність щілин в залежності від початкового стану поверхні
Травлення	0,5–1,0	Високі загострення та глибокі впадини
Електрополірування	0,5–1,0	Електрополірування не набагато покращує значення R_a , але згладжує загострення, поліпшуючи очищення

Механічне полірування із застосуванням окису алюмінію або карбїду кремнію, абразивний пісчаний номер: 500, 320, 240, 180, 120, 60	0,1–0,25 0,15–0,4 0,2–0,5 ≤0,6 ≤1,1 ≤3,5	
---	---	--

Отже, з аналізу оглянутих літературних джерел видно, що шорсткість поверхні та її рельєф відіграють важливу роль у процесі адгезії і формуванні біоплівки, коли йдеться про порівняння поверхні з розмірами мікроорганізмів. Припускається, що збільшення шорсткості поверхні збільшує її площу, і тим самим покращуються умови для адгезії бактерій. Тому чим більша шорсткість, тим краще поверхня захищає мікроорганізми від чинників навколишнього середовища, зокрема у молочній промисловості від санітарної обробки мийними і дезінфікуючими засобами. З'ясування і розуміння ролі фізико-хімічних властивостей у процесі адгезії та формування біоплівки мікроорганізмами на поверхнях технологічного обладнання та харчових продуктів допоможе контролювати розвиток небажаних мікроорганізмів в технології виготовлення молочних продуктів.

5.3.4. Вплив гідрофобності на адгезійні властивості

Поверхня металів, порівняно з полімерною, характеризується високою поверхневою енергією і відноситься до гідрофільної, яка є негативно заряджена і при взаємодії з харчовим продуктом легко адсорбує розчиненні у водній фазі органічні речовини, тобто швидко забруднюється [4, 10]. Крім того, оксиди металів забезпечують поверхні позитивний заряд, який посилює мікробну адгезію через те, що бактерії мають негативний заряд. Вважається, що гідрофобні поверхні є більш сприйнятні для прикріплення мікроорганізмів, ніж гідрофільні [9]. У дослідженнях було показано, що спори вегетативних мікроорганізмів краще адгезуються до гідрофобної поверхні пластику, порівняно з гідрофільною скляною поверхнею. Для прикріплення до гідрофільного скла мікроорганізмам потрібний довший період часу. Встановлено, що гідрофобні і гідрофільні бактерії у більших кількостях прикріплялися до сталі AISI-304, AISI-316, яка відноситься до гідрофобної поверхні з низькою поверхневою енергією. У той же час, до скляних поверхонь, які відносяться до гідрофільних мікроорганізми у меншій кількості прикріплялися [11].

У дослідженнях [11] науковці вивчали процес адгезії у штамів *Listeria monocytogenes* та *Salmonella spp.* на трьох матеріалах: нержавіючій сталі AISI-304, гумі та на політетрафторетилені. Результати виявили, що штами сальмонел і лістерій у більшій кількості прикріплювалися до гідрофобних матеріалів гуми та політетрафторетилену, порівняно з гідрофобною нержавіючою сталлю.

Вчені [12] досліджували вплив обробки поверхні нержавіючої сталі AISI-304 на її змочуваність та виявили, що груба обробка сталі з великою шорсткістю впливала на процес ефективного миття. Однак не виявлено прямої кореляції між обробкою, змочуваністю та адгезією у *Streptococcus thermophilus*. Інші дослідники при вивченні адгезії у термостійких стрептококів (*Streptococcus thermophilus* і *Streptococcus waiu*) на різних матеріалах (нержавіюча сталь марок AISI-304L і AISI-316L, оцинкована сталь, алюміній, мідь та скло) виявили, що бактерії краще прикріплюються до нержавіючої і оцинкованої сталі, порівняно з мідяною, алюмінієвою поверхнею і склом. Також адгезія швидше проходила на нержавіючій сталі марки AISI-316L, порівняно з сталлю AISI-304L [13]. Проте, у дослідженнях [14, 15] повідомляється, що на водопровідних трубах, які виготовлені із нержавіючої сталі марки AISI-304 виділялися набагато більше мікроорганізмів упродовж декількох місяців дослідження, порівняно із такими трубами, що виготовлені із нержавіючої сталі марки AISI-316. Загалом дослідники [13, 14, 15] прийшли до думки, що негативно заряджені поверхні притягують більшу кількість мікроорганізмів, ніж позитивно заряджені поверхні, також непасивірована поверхня нержавіючої сталі (без оксидного шару) у більшій мірі знижує адгезію термостійких стрептококів. Таким чином вони припустили, що оксидна плівка, яка покриває поверхню нержавіючої сталі посилює адгезію мікроорганізмів. Отже, хімічний склад поверхні нержавіючої сталі і її поверхнева енергія можуть суттєво вплинути на мікробну адгезію.

Також, повідомляються різні дані про вплив змочуваності поверхні на мікробну адгезію. Виявлено, що кількість адгезованих бактерій знижувалася з підвищенням поверхневої гідрофобності, а мікроорганізми, які прикріплювалися до гідрофобних поверхонь, легше видалялися за рахунок збільшення сили потоку під час циркуляції рідини [4, 5, 6, 7, 12]. Проте, інші дослідники [18], вказують, що між поверхневою змочуваністю та мікробною адгезією відсутній кореляційний зв'язок.

Отже, дослідники вважають, що матеріал з високою поверхневою енергією, такий як нержавіюча сталь відноситься до гідрофобного, який є негативно заряджений і легко забруднюється.

Дослідниками [16, 17], які вивчали процес формування біоплівки у мікроорганізмів виділених з поверхонь технологічного обладнання і молока виявлено, що бактерії родів *Micrococcus*, *Corynebacterium*, *Lactobacillus*, *Enterococcus* та *Acinetobacter* утворювали щільніші в 1,3–1,8 рази біоплівки на поверхні алюмінію, оцинкованій сталі, гумі та пластику, порівняно з нержавіючою сталлю марки AISI-316 та склом. Проте, такі види бактерій, як *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* і *Escherichia coli* формували біоплівки однакової щільності практично на всіх досліджених поверхнях. Вони вказують, що для мікробної адгезії крім виду матеріалу, важливе значення мають фізіологічні особливості мікроорганізмів. У дослідженнях [18] наведено дані про поверхні металів, які покриті сріблом чи міді. Встановлено, що паспортизовані штами стрептококів слабо колонізували поверхні оброблені даними металами, проте «дикі» види штамів бактерій інтенсивно адгезувалися до поверхні та швидко формували щільні біоплівки.

Отже, з оглянутих літературних джерел даного підрозділу видно, що властивості поверхні технологічного обладнання (топографія, шорсткість, хімічний склад, вільна енергія) впливають на процес мікробної адгезії, проте однозначні дані відсутні. Для з'ясування і більш глибокого розуміння процесу адгезії і формування біоплівки на поверхнях технологічного обладнання необхідно провести ґрунтовні дослідження з використанням міждисциплінарного підходу з врахуванням фізіології мікроорганізмів та знання фізичних і хімічних властивостей поверхні.

5.4. Вплив біоплівки на швидкість корозії робочих поверхонь технологічного устаткування

Згідно літературних даних [12, 19, 20], екзополімерний матрикс є основним чинником мікробної корозії, так як є осередком перебігу біоелектрохімічного процесу. Дослідженнями Пуріш Л. М. та ін. [13, 22, 14], встановлено, що на сталевих зразках формується біоплівка в складі якої, наряду з сульфатвідновлювальними бактеріями, розвиваються бактерії роду *Bacillus* та *Pseudomonas*, які є сталими асоціантами сульфатредукторів. Важливим чинником корозії є екзополісахаридний матрикс біоплівки. Хімічний склад екзополісахаридного матриксу залежить від умов, в яких формується біоплівка та видів бактерій, які його продукують. Головним компонентом матриксу є екзополісахариди, які відіграють важливу роль у формуванні його структури. На властивості екзополісахаридного матриксу впливає спосіб, у який

мономери екзополісахаридів з'єднуються між собою. Поліанінові властивості екзополісахаридного матриксу, які найчастіше виступають карбоксильними групами, забезпечують з'язування іонів Феруму з поверхні металу та сприяють закріпленню в біоплівці продуктів корозії. Екзополісахаридний матрикс підвищує ефективність взаємодії клітин із поверхнею металу, що призводить до зростання рівня корозійних пошкоджень [12, 13].

У дослідженнях [15, 16, 17, 18, 19] з вивчення мікробної корозії спричиненою мікроорганізмами *Thiobacillus thioparus* і *Stenotrophomonas maltophilia*, встановлено швидкість корозії маловуглецевої сталі та склад екзополімерного матриксу біоплівки. Показано, що компоненти сформованої біоплівки бактеріями *Thiobacillus thioparus* і *Stenotrophomonas maltophilia* прискорюють інтенсивність корозії маловуглецевої сталі. Крім того, дослідження адгезивних властивостей у культур *Thiobacillus thioparus* 4М, *Stenotrophomonas maltophilia* 13М та їх асоціацій виявили, що при сумісному культивуванні кількість адгезованих клітин до поверхні збільшується, порівняно із чистою культурою *Thiobacillus thioparus* 4М. У всіх варіантах досліду, де використовувалися змішані культури *Thiobacillus thioparus* і *Stenotrophomonas maltophilia* сумарна швидкість корозії перевищувала загальну швидкість, що була спричинена впливом відповідних індивідуальних культур. Дослідники вважають, що, бінарна культура виділених бактерій проявляє більшу корозійну активність, порівняно, з дією монокультур на зразки маловуглецевої сталі.

Інші дослідники [14] також встановили, що основною причиною корозії залізобетонних конструкцій є бактерії виду *Thiobacillus thioparus* і *Thiobacillus ferrooxidans*, які також перебувають у біоплівці на цих поверхнях. Мікроорганізми, що утворюють біоплівки, проявляють високу метаболітичну активність і здатні пошкоджувати різні за хімічним складом захисні покриття. Це відбувається завдяки тому, що під час росту і розвитку біоплівки формується екзополімерний матрикс, який складається з полісахаридів, ліпосахаридів, ферментів та інших сполук, які приймають участь у процесах окиснення і відновлення різних сполук і поверхонь [14].

Отже, підсумовуючи можна відмітити, що прикріплені бактерії на поверхні нержавіючої сталі формують біоплівку, матрикс, якої спричинює корозію матеріалу, мікробному забрудненні харчових продуктів та економічним витратам.

5.4.1. Вплив дефектів робочих поверхонь технологічного обладнання на ефективність санітарної обробки

Незважаючи на запровадження всього комплексу санітарно-гігієнічних вимог таких, як миття, дезінфекція, теплова обробка, щодо знищення мікроорганізмів на технологічному устаткуванні та в готовому продукті не завжди досягається ефективний результат. Це пов'язано з тим, що мікроорганізми виживають на технологічному устаткуванні завдяки здатності формувати біоплівки, а також в процесі постійної санобробки залишаються стійкі штами мікроорганізмів [14, 16, 18, 19]. За даними [13, 19], на обладнанні, де виявлено хоча б одну планктону бактерію, там є близько 1000 мікроорганізмів, сформованих у біоплівки. Тому дослідники вважають, що мікробіологічне забруднення технологічного устаткування виникає через мікроорганізми, які залишилися і розмножилися на поверхні устаткування після санітарної обробки [14, 18, 19]. Переважна більшість харчових захворювань пов'язана з патогенними мікроорганізмами, а не фізичним та хімічним забрудненнями. При сприятливих умовах такі мікроорганізми ростуть дуже швидко. Тому необхідно уникати застійних (мертвих) зон, тріщин, щілин, де можуть за сприятливих умов розвиватися мікроорганізми [13, 14, 15, 19]. Для уникнення щілин на поверхні, що контактує з продуктом потрібно: не допускати прямого з'єднання металу з металом, крім зварювання, оскільки в такій щілині можуть накопичуватися залишки бруду та мікроорганізми; не допускати не лінійності з'єднань у під'єднанні трубопроводів до обладнання [18]. Необхідно відзначити, що добрий гігієнічний дизайн скорочує тривалість санітарної обробки елементів обладнання, але навіть на гігієнічно правильно розроблених технологічних лініях є місця, де продукти довше затримуються – ці місця називають «мертвими зонами». Відомо [11, 17], що якщо клітина кишкової палички знаходиться в мертвій зоні, заповненій 5 см^3 в'язким низько кислотним харчовим продуктом за температури 25°C , то менш ніж за 24 години кількість клітин *Escherichia coli* збільшиться до концентрації 2×10^8 КУО/см³. Якщо кожну годину вимивається з мертвої зони 1 см^3 продукту в основний потік, то до кінця першого дня виробництва продукт буде забруднюватися 200 000 000 клітинами кишкової палички кожну годину.

Чистота технологічного обладнання є дуже важливим показником. Обладнання, яке важко миється, потребує складніших мийних процедур, концентрованіших мийних засобів та тривалішого часу миття [18, 20, 24]. Це в подальшому призводить до більших витрат, зменшення терміну працездатності обладнання та більшої кількості відходів. Тому, щоб забезпечити ефективний

процес миття, поверхня повинна бути без подряпин, ямок, тріщин, гострих кутів, виступів та «мертвих» зон [16, 17].

Дослідження показують, що мікробні біоплівки, які утворюються на поверхнях технологічного обладнання молочної галузі, негативно впливають на безпечність готової продукції і становлять небезпеку для здоров'я людей, оскільки в складі біоплівок крім сапрофітної мікрофлори можуть бути патогенні мікроорганізми [11, 13, 15]. Біоплівки сформовані *Escherichia coli*, *Listeria spp.*, *Yersinia enterocolitica*, *S. aureus*, *Salmonella spp.*, *Pseudomonas spp.*, *Bacillus cereus* та ін. були виявлені на молочному обладнанні [13, 14, 15, 16, 19, 20]. Біоплівки утворені бактеріями родів *Streptococcus*, *Staphylococcus*, *Shigella*, *Escherichia*, *Enterobacter*, *Bacillus* – на поверхнях пастеризаторів молочних заводів [22, 23].

Відомо [14, 16, 19], що процес формування біоплівок на поверхнях технологічних ліній кондитерського обладнання має свої особливості, які відрізняють їх від біоплівок сформованих на медичному обладнанні. Це пов'язано з наявністю великої кількості згинів, з'єднань, значної довжини обладнання, автоматичного миття. Тому рельєф поверхні, її структура і шорсткість мають значний вплив на процес формування біоплівок, які потребують детального всестороннього вивчення.

Незважаючи на те, що на ринку є значна кількість засобів для санітарної обробки молочного обладнання, не всі вони достатньо ефективні [15, 19]. Останні наукові дослідження [16, 17, 20], вказують, що дезінфікуючі засоби і антибіотики не завжди діють на бактерії у біоплівках. Повідомляється, що в основному, стійкість бактерій у біоплівці залежить від складу матриксу, який відрізняється у різних родів бактерій [16, 18]. Тому дезінфікуючі засоби, які ефективні на біоплівки одних родів бактерій, можуть бути недієві на інші.

Таким чином, здатність бактерій до формування біоплівки на поверхні технологічного обладнання харчової галузі є важливою умовою виживання і відповідно джерелом контамінації продукції. Отже, вивчення мікрофлори технологічного обладнання галузі, процесу плівкоутворення, залежно від рельєфу поверхні, шорсткості і впливу різних чинників дозволить глибше зрозуміти процес адгезії та запропонувати вимоги щодо обробки поверхонь за показником шорсткості.

5.5. Формування мікробних біоплівок на нержавіючій сталі з різною шорсткістю поверхні

Проведення досліджень з вивчення процесу плівкоутворення на нержавіючій сталі з різною шорсткістю упродовж певного часу та з використанням різних форм і розмірів бактерій дозволять глибше зрозуміти процес формування мікрофлори на обладнанні і відповідно контамінацію харчових продуктів. З'ясування впливу шорсткості поверхні на мікробну адгезію сприятиме удосконаленню та модифікації поверхонь, які перешкоджають адгезії.

У промисловості найчастіше використовують для обладнання і устаткування нержавіючі корозійно-стійкі сталі які можуть мати різну шорсткість поверхні 0,2–3,2 мкм. Якість поверхні прийнято оцінювати за геометричними параметрами і станом поверхневого шару, який визначається фізико-механічними властивостями і структурою. Характеристика геометричних властивостей поверхні включає макро- і мікрогеометричні параметри. Для дослідження використані пластинки з нержавіючої корозійно-стійкої нікель-хромової аустенітної сталі марки AISI 321 (стандарт Американського інституту сталі та сплавів) розміром 30×30 мм та товщиною 4 мм, з шорсткістю поверхні $R_a=2,687\pm0,014$ мкм, $R_a=0,95\pm0,092$ мкм, $R_a=0,63\pm0,087$ мкм, $R_a=0,30\pm0,065$ мкм, $R_a=0,25\pm0,035$ мкм, $R_a=0,24\pm0,026$ мкм та $R_a=0,16\pm0,018$ мкм.

Процес формування біоплівки відбувався штамами *Escherichia coli* ATCC 25299 та *Enterococcus faecalis* ATCC 19433 на поверхні нержавіючої сталі марки AISI 321 з різною шорсткістю протягом певного часу.

Експериментальні дослідження проводили з використанням сучасних стандартних і загальноприйнятих методів: технічні (визначення шорсткості поверхні нержавіючої сталі), мікроскопічні (світлова та електронна мікроскопія процесу плівкоутворення і деградації), спектрофотометричні (оптична густина (щільність) біоплівки), мікробіологічні (кількісна характеристика та морфологія мікроорганізмів, мікробіологічні показники молочного обладнання та молочних продуктів).

Дослідження процесу плівкоутворення мікроорганізмами на поверхнях металів з різною шорсткістю проводили у стерильній чашки Петрі. В чашу ставили стерильні пластини з нержавіючої сталі з відповідною шорсткістю поверхні і вносили в чашку стерильний м'ясопептонний бульйон (МПБ) та відповідну тест-культуру (*Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis* чи будь яку іншу виділену з обладнання) у концентрації, щоб на 1 см² площі пластини припадало від 1 до 50 тис. клітин. Інкубацію проводили за

температури від +17°C, +25°C до +37°C упродовж 3, 6, 9, 12, 18 та 24 годин, що залежало від мети досліду. Після інкубації пластинки виймали із чашок Петрі, триразово відмивали від планктонних (неприкріплених) мікроорганізмів фосфатним буфером. Фіксували утворені мікробні біоплівки на пластинках 96° етиловим спиртом. Після фіксування біоплівки фарбували, для цього пластинки занурювали у 0,1 % кристалічно фіолетовий водний розчин. Після фарбування пластинки триразово відмивали фосфатним буфером і висушували.

Після висушування кожену пластинку окремо заливали 7,0 см³ 96° етиловим спиртом та залишали на 20 хв. Після експозиції 20 хв відбирали 5 см³ промивного розчину з біоплівок та визначали оптичну густину спектрофотометрично за довжини хвилі 570 нМ на фотометрі КФК-3 (рис. 5.2) виробник Україна.



Рис. 5.2. Фотометр (КФК-3)

Електронно-мікроскопічні дослідження процесу формування біоплівок на нержавіючій сталі проводили на електронному растровому мікроскопі (РЕМ 106 И, Україна) при збільшенні від 2000 до 5000 разів (рис. 5.3). Крім того візуально оцінили адгезію мікроорганізмів у западинах чи на виступах шорсткості за допомогою мікроінтерферометра МІІІ-4У4.2 при збільшенні 1500 разів (рис. 5.4).



Рис. 5.3. Електронний растровий мікроскоп (РЕМ 106 И)



Рис. 5.4. Мікроінтерферометр МІІ-4У4.2

Для визначення параметрів поверхневого шару використано наступну методику:

- сканування поверхні за допомогою 3D сканера David Laser Scanner SLS-1 із застосуванням програмного забезпечення DavidL aser Scanner Professional Edition;
- обробка відсканованої поверхні за допомогою програми PowerShape;
- визначення необхідних геометричних характеристик відсканованої частини поверхні.

При скануванні отримано велику кількість точок, які об'єднуються в поверхню. Для визначення шорсткості та хвилястості поверхневого шару проводимо виріз відсканованої ділянки поверхні розміром 10 x 10 мм в програмному забезпеченні PowerShape, який наведено на рис. 1.4. Бодуємо дві перпендикулярні площини (рис.1.5), що будуть розрізати ділянку.

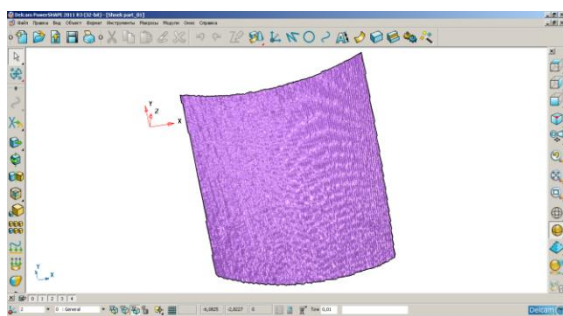


Рис. 5.5. Фрагмент ділянки розміром 10x10 мм

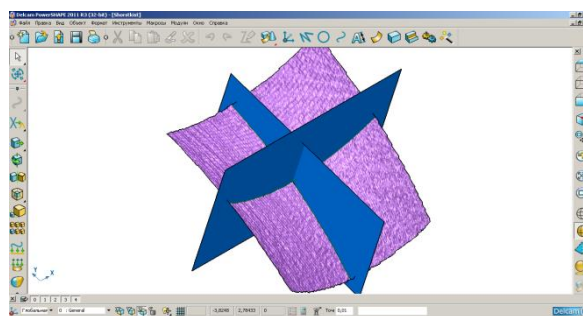


Рис. 5.6. Розріз ділянки перпендикулярними площинами

Фрагмент поздовжньої профілограми з точками (вершинами і впадинами) зображено на рис. 5.7. Аналогічні операції проводимо і з поперечною профілограмою, фрагмент якої з точками вершин і впадин зображено на рис. 5.8.

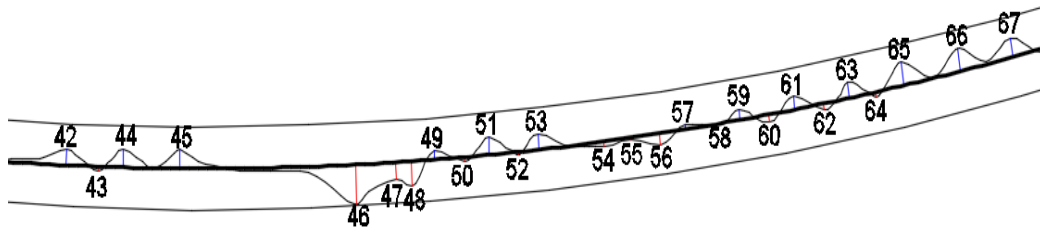


Рис. 5.7. Фрагмент поздовжньої профілограми з точками вершин та впадин

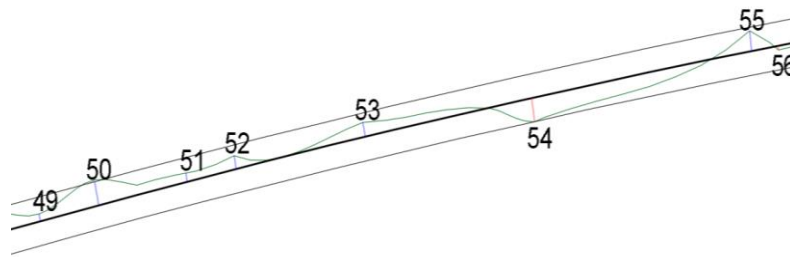


Рис. 5.8. Фрагмент поперечної профілограми з точками вершин та впадин

Визначивши довжини перпендикулярів від впадин чи вершин до центральної лінії за допомогою формули продиммо визначення шорсткості:

$$R_a = \frac{\sum_i^n |Y_i|}{n},$$

де n – кількість точок (в нашому випадку 107);

$\sum_i^n |Y_i|$ – сума довжин усіх перпендикулярів (в нашому випадку 2038 мкм).

Отже,

$$R_{a_1} = \frac{203,8}{107} = 1,905 \text{ (мкм)}.$$

$$R_{a_2} = \frac{104,7}{64} = 1,6 \text{ (мкм)}.$$

Відповідно середнє арифметичне, тобто:

$$R_a = \frac{R_{a_1} + R_{a_2}}{2} = \frac{1,905 + 1,635}{2} = 1,77 \text{ (мкм)}.$$

Скориставшись стандартною таблицею прийнятих величин R_a , можна визначити, що дослідна ділянка має шорсткість в межах R_a 1,6 та R_a 2,0.

Очевидно, що в окремих випадках пошук геометричних зв'язків для забезпечення плівкоутворення мікроорганізмами на поверхнях металів може бути суттєво спрощеним, якщо вирішується початковий синтез поверхні та кількість мікроорганізмів. Разом з тим нестабільність значень адгезії і зовнішніх умов експлуатації поверхонь, рівно як і варіації структурованим параметрам плівки призводять до необхідності пошуку нестандартних підходів для встановлення їх зв'язків. Ситуація ускладнюється значними розбіжностями початкових ділянок поверхні, особливостями мікробної плівки тощо.

Існує кореляція між шорсткістю поверхні та бактеріальною адгезією, причому прикріплення мікроорганізмів до поверхні збільшувалося із зростанням шорсткості.

Теорія адгезійних взаємодій мікроорганізмів з шорсткістю поверхнею створювалася на основі проведених досліджень. Вивчення явищ адгезії мікроорганізмів з шорсткістю поверхнею умовно поділяємо на два етапи: нанесення кількості мікроорганізмів на поверхню з врахуванням часу і температури утворення плівки, і коли відбулося відносно утворення плівки. Обидва ці випадки мають місце в системах транспортування вязких матеріалів, властивості яких обмежані *опорними деформаціями, стисканням і швидкостями*.

Проведені дослідження встановили, що на поверхні нержавіючої сталі з шорсткістю $2,687 \pm 0,014$ мкм, процес плівкоутворення у *E. coli* та *S. aureus* проходив однаково упродовж з 3 до 24 год. інкубації та не залежав від розмірів і форми бактерій, а на поверхні з шорсткістю $0,95 \pm 0,092$ мкм, процес плівкоутворення у *S. aureus* проходив інтенсивніше, ніж у *E. coli*. Тому упродовж перших 3 год інкубації оптична щільність сформованих біоплівки *S. aureus* була в 1,2 раза більша, порівняно з щільністю біоплівки сформованих *E. coli*. Наступні 15 годин інкубації сформовані біоплівки *S. aureus* були в середньому в 1,3 раза щільніші, а починаючи з 18 по 24 год інкубації достовірної різниці між їх щільністю не виявлено. Це дає підставу вважати, що *S. aureus* завдяки кулястій формі здатний розміщуватися у западинах шорсткості $0,95 \pm 0,092$ мкм і швидше адгезуватися до поверхні. Водночас *E. coli*, завдяки паличковидній формі, за такої шорсткості поверхні може адгезуватися у западини тільки повздовж і формувати біоплівки. Проте виявили, що інтенсивність процесу плівкоутворення у бактерій на поверхні з шорсткістю $0,95 \pm 0,092$ мкм, залежить від форми і розмірів бактерій тільки до 18 год. інкубації.

Отримані дані узгоджуються з дослідженнями [21, 22], які вказують, що адгезія *L. monocytogenes* на нержавіючій сталі з шорсткістю нижче 0,8 мкм

проходила повільніше, ніж на поверхні з шорсткістю 30 мкм. Проте встановлено, що крім шорсткості поверхні на процес формування біоплівки впливає форма і розмір клітин мікроорганізмів. Це пов'язано з тим, що за шорсткості 0,95 і 0,63 мкм кокові форми мікроорганізмів інтенсивніше формували біоплівки, ніж паличковидні. Підтримуємо думку вчених [12], що це явище пов'язано із збільшенням площі контакту бактерій з поверхнею.

При використанні у дослідах нержавіючої сталі з шорсткістю менше 0,8 мкм, як це рекомендовано у харчовій промисловості згідно гігієнічних норм (93/43/ЕЕС Council directive on the hygiene of foodstuffs), встановлено, що за шорсткості поверхні $0,63 \pm 0,087$ мкм інтенсивність плівкоутворення *S. aureus* була в середньому в 1,4 раза швидша, ніж у *E. coli*, до 18 год інкубації. Водночас, за шорсткості $0,16 \pm 0,018$ мкм процес плівкоутворення проходив однаково у *S. aureus* і *E. coli*, але сформовані біоплівки були нижчої щільності, порівняно з такими, які формувалися за шорсткості $0,63 \pm 0,087$ мкм.

На рис. 1.8 подано схематичну модель сформованої біоплівки у западинах та на виступах шорсткості.

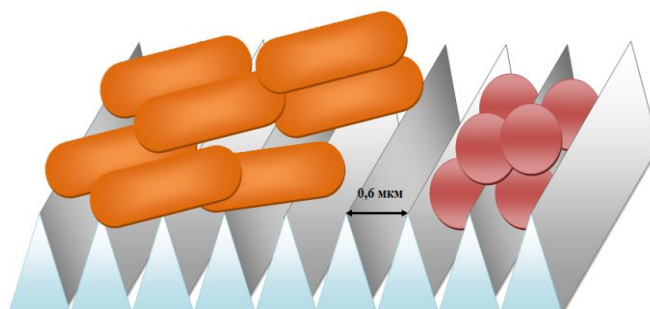


Рис. 5.9. Схематична модель сформованої біоплівки у западинах та на виступах шорсткості

Розроблена методика дослідження оптичної щільності біоплівки, заснована на використанні плану реалізації експерименту в програмному комплексі Microsoft Excel, що дозволяє отримати математичну модель процесу плівкоутворення у вигляді рівняння регресії. Функцією відгуку отриманого рівняння є щільність біоплівки від шорсткості та часу. В якості параметра оптимізації використано зміну кількості бактерій під час технологічного процесу. Та, яка залежність між вхідними параметрами і кількістю бактерій нам не відомо, то маємо модель, яку можна представити у вигляді:

$$Y=f(Ra, \tau),$$

де Y – зміна щільності біоплівки, тис;

τ – час, год;

Ra – шорсткість поверхні обладнання. Y_1 – *E. Coli* Y_2 – *E. faecalis*за.

За результатами експерименту (табл. 5.1) отримуємо регресійні квадратичні рівняння закону зміни щільності від шорсткості поверхні та часу, які зображено графічно на рис. 5.10 для *E. Coli* (а) та *E. faecalis* (б) за час 18 год при $Ra=0,63\pm 0,087$ мкм.

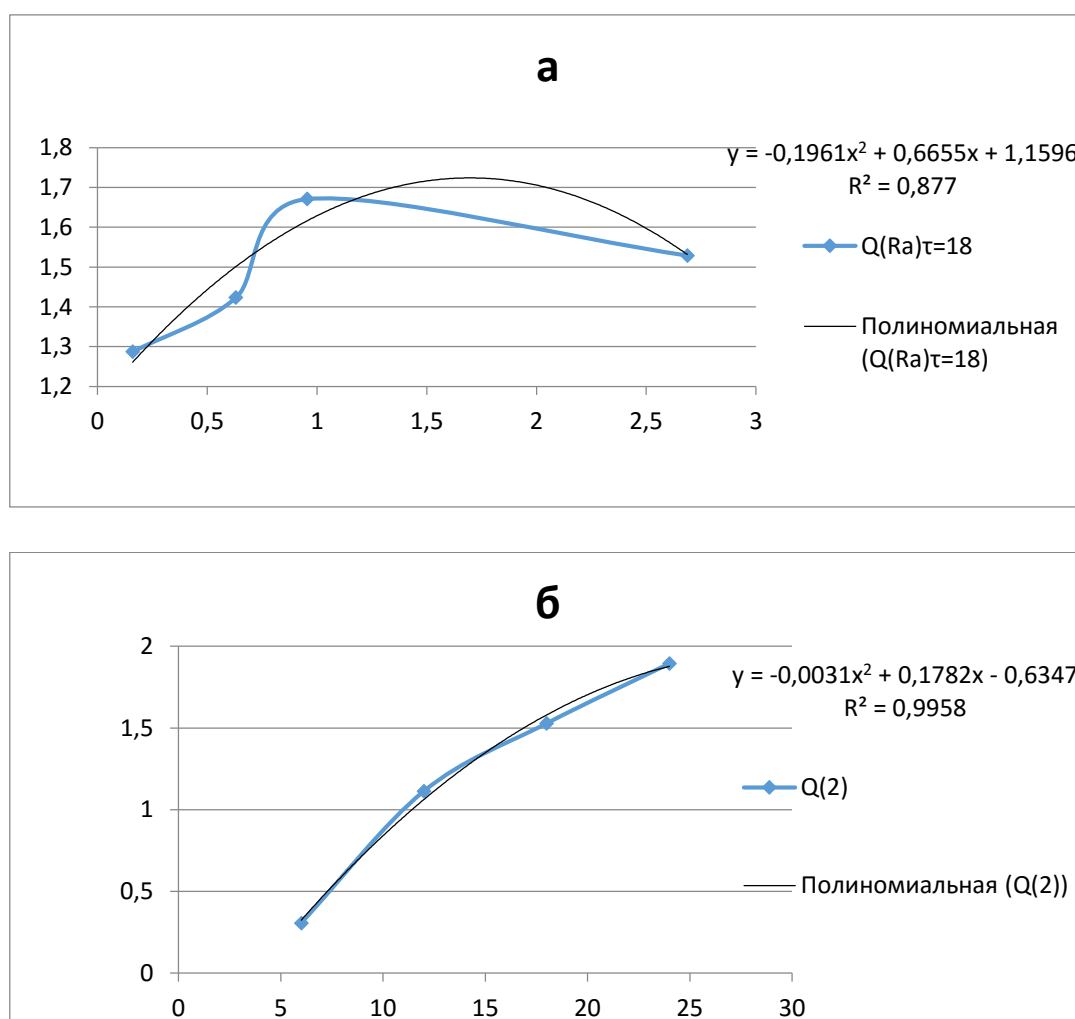


Рис. 5.10. Зміна оптичної щільності *E. Coli* (а) та *E. faecalis*за(б) за час 18 год

Таким чином, з отриманих залежностей рис. 5.10 можна відзначити, що на процес формування біоплівок *E. Coli* та *E. faecalis* на нержавіючій сталі крім шорсткість поверхні значний вплив має початкова кількість бактерій. На

пластинках сталі з шорсткістю $0,95 \pm 0,018$ мкм процес плівкоутворення *E. Coli* проходить повільніше, порівняно з *E. faecalis* (рис. 5.10). Відповідно до отриманих нами даних та побудови залежностей виявлено, що щільність плівки залежить від розмірів бактерій та від початкової кількості мікробних клітин на поверхні сталі.

Таблиця 5.1

***E. coli*, $t=37^{\circ}\text{C}$, $Ra=0,955$ мкм**

Початкова кількість бактерій	0 Контроль	3	6	9	12	18	24
До 1 тис.	0,091	0,105	0,139	0,235	0,634	1,287	1,602
2–10 тис.		0,121	0,247	0,342	1,223	1,671	1,769
20–50 тис.		0,181	0,374	0,463	1,304	1,716	1,804

***E. f.*, $t=37^{\circ}\text{C}$, $Ra=0,955$ мкм**

Початкова кількість бактерій	0 Контроль	3	6	9	12	18	24
До 1 тис.	0,091	0,112	0,156	0,307	0,672	1,295	1,670
2–10 тис.		0,136	0,263	0,395	1,246	1,683	1,774
20–50 тис.		0,196	0,392	0,467	1,415	1,743	1,851

Тому вважаємо, що для ефективної санітарної обробки молочного обладнання максимальна шорсткість поверхні має становити – 0,5 мкм. Така обробка є оптимальним рішенням для попередження плівкоутворення, як коковими, так паличковидними формами бактерій.

Для отримання математичних залежностей при порівнянні результатів дослідження оптичної густини по фактору часу та шорсткості для різних температур та початкової кількості бактерії, запропоновано регресійні рівняння оптичної густини й розвитку бактерій.

Для бактерій *E. Coli*. Рівняння регресії оптичної густини (кількості) Y по факторах часу t та шорсткості rd для різних температурних діапазонів $T^{\circ}\text{C}$ та початкової кількості бактерій згідно таблиці 1.2 буде:

$$Y_{k,i} := y_0 + y_1 \cdot r_k + y_2 \cdot t_i + y_3 \cdot r_k \cdot t_i + y_4 \cdot (r_k)^2 + y_5 \cdot (t_i)^2$$

Таблиця 5.2

	37* <1	37*2 – 10	37*>50	25*-10	17*2 -10
y0	-0.049	-0.181	-0.169	-0.027	0.08
y1	0.171	0.281	0.217	0.151	-0.028
y2	0.014	0.063	0.08	0.018	3.239*10^-3
y3	9.522*10^-3	4.579*10^-3	8.186*10^-3	0.01	0.01
y4	-0.055	-0.084	-0.058	-0.054	5.657*10^-3
y5	1.671*10^-3	3.785*10^-4	-2.485*10^-4	1.237*10^-3	7.219*10^-4

Рівняння регресії швидкості зміни кількості **Z** по факторах часу **t** та шорсткості **r** для різних температурних діапазонів **T** °С та початкової кількості бактерій згідно таблиці 5.3:

$$Z_{k,i} := z_0 + z_1 \cdot r_k + z_2 \cdot t_i + z_3 \cdot r_k \cdot t_i + z_4 \cdot (r_k)^2 + z_5 \cdot (t_i)^2$$

Таблиця 5.3

	37*<1	37*2 – 10	37*>50	25*2 -10	17*2 -10
z0	-0.031	-0.056	-0.051	-0.033	-0.014
z1	0.013	0.039	0.027	0.023	-3.509*10^-5
z2	0.013	0.021	0.021	0.012	6.538*10^-3
z3	-5.267*10^-4	-8.55*10^-4	-8.591*10^-6	6.023*10^-5	-1.62*10^-4
z4	-3.2*10^-4	-7.675*10^-3	-3.668*10^-3	-5.458*10^-3	3.285*10^-3
z5	-3.325*10^-4	-6.006*10^-4	-6.451*10^-4	-2.947*10^-4	-1.947*10^-4

Шляхом порівняння інтенсивностей прояву популяцій **E. Coli** для **T=37*I(n<1)**, **I(2<n<10)**, **I(20<n<50)** отримали, що $Y(2<n<10)_{k,I} = s_{1,k,i} \cdot Y(n<1)_{k,I}$, $Y(20<n<50)_{k,I} = s_{2,k,i} \cdot Y(2<n<10)_{k,I}$, де:

$$s1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1.056 & 1.139 & 1.152 & 1.252 \\ 1.167 & 2.075 & 1.777 & 1.346 \\ 1.201 & 1.435 & 1.455 & 1.554 \\ 1.698 & 1.776 & 1.929 & 1.252 \\ 1.625 & 1.472 & 1.298 & 1.087 \\ 1.278 & 1.112 & 1.104 & 1.09 \end{pmatrix} \quad s2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1.053 & 1.165 & 1.496 & 1.396 \\ 1.889 & 1.198 & 1.514 & 1.56 \\ 1.6 & 1.178 & 1.354 & 1.226 \\ 1.138 & 1.085 & 1.066 & 1.363 \\ 1.051 & 1.125 & 1.027 & 1.199 \\ 1.05 & 1.089 & 1.02 & 1.133 \end{pmatrix}$$

де $k = 0, \dots, 6$; $i = 0, \dots, 3$.

Таким чином, враховується початкова k -сть бактерій, як фактор.

Для бактерій *E. Faecalis*. Рівняння регресії оптичної густини (кількості) Y по факторах часу t та шорсткості r для різних температурних діапазонів $T^{\circ}C$ та початкової кількості бактерій згідно таблиці 5.4:

$$Y_{k,i} := y_0 + y_1 \cdot r_k + y_2 \cdot t_i + y_3 \cdot r_k \cdot t_i + y_4 \cdot \{r_k\}^2 + y_5 \cdot \{t_i\}^2$$

Таблиця 5.4

	37* < 1	37* 2 – 10	37* > 50	25* 2 - 10	17* 2 - 10
y0	-0.058	-0.177	-0.161	-0.065	0.074
y1	0.189	0.245	0.161	0.143	-0.028
y2	0.016	0.069	0.092	0.038	5.594*10^-3
y3	0.011	5.343*10^-3	8.453*10^-3	6.702*10^-3	0.012
y4	-0.061	-0.068	-0.034	-0.047	4.798*10^-3
y5	1.56*10^-3	1.715*10^-4	-6.781*10^-4	9.417*10^-4	7.161*10^-4

Рівняння регресії швидкості зміни кількості Z по факторах часу t та шорсткості r для різних температурних діапазонів $T^{\circ}C$ та початкової кількості бактерій згідно таблиці 1.5.

$$Z_{k,i} := z_0 + z_1 \cdot r_k + z_2 \cdot t_i + z_3 \cdot r_k \cdot t_i + z_4 \cdot \{r_k\}^2 + z_5 \cdot \{t_i\}^2$$

Таблиця 5.5

	$37^{*}<1$	$37^{*}2 - 10$	$37^{*}>50$	$25^{*}2 - 10$	$17^{*}2-10$
z0	-0.032	-0.027	-0.053	-0.032	-0.027
z1	0.028	0.021	0.05	0.033	0.021
z2	0.013	$8.004 \cdot 10^{-3}$	0.02	0.013	$8.004 \cdot 10^{-3}$
z3	$-9.673 \cdot 10^{-4}$	$-4.898 \cdot 10^{-4}$	$-1.185 \cdot 10^{-3}$	$-1.942 \cdot 10^{-4}$	$-4.898 \cdot 10^{-4}$
z4	$-3.618 \cdot 10^{-3}$	$-2.157 \cdot 10^{-3}$	$-6.644 \cdot 10^{-3}$	$-8.725 \cdot 10^{-3}$	$-2.157 \cdot 10^{-3}$
z5	$-3.21 \cdot 10^{-4}$	$-2.354 \cdot 10^{-4}$	$-5.768 \cdot 10^{-4}$	$-3.279 \cdot 10^{-4}$	$-2.354 \cdot 10^{-4}$

Шляхом порівняння інтенсивностей прояву популяцій *E. faecalis* для $T=37^{*}I(n<1)$, $I(2<n<10)$, $I(20<n<50)$ отримали, що $Y(2<n<10)_{k,I}=s1_{k,i} \cdot Y(n<1)_{k,I}$, $Y(20<n<50)_{k,I}=s2_{k,i} \cdot Y(2<n<10)_{k,I}$, де:

$$s1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1.056 & 1.111 & 1.214 & 1.311 \\ 1.229 & 1.759 & 1.686 & 1.57 \\ 1.186 & 1.279 & 1.202 & 1.405 \\ 1.899 & 1.794 & 1.854 & 1.338 \\ 1.585 & 1.486 & 1.3 & 1.077 \\ 1.293 & 1.144 & 1.062 & 1.09 \end{pmatrix} \quad s2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1.042 & 1.133 & 1.441 & 1.729 \\ 2.007 & 1.459 & 1.49 & 1.404 \\ 2.039 & 1.259 & 1.266 & 1.361 \\ 1.118 & 1.084 & 1.136 & 1.307 \\ 1.104 & 1.129 & 1.036 & 1.203 \\ 1.051 & 1.061 & 1.043 & 1.128 \end{pmatrix}$$

де $k=0, \dots, 6$; $i=0, \dots, 3$.

Згідно регресійного рівняння побудуємо поверхні відгуку (рис. 5.11, 5.12, 5.13).

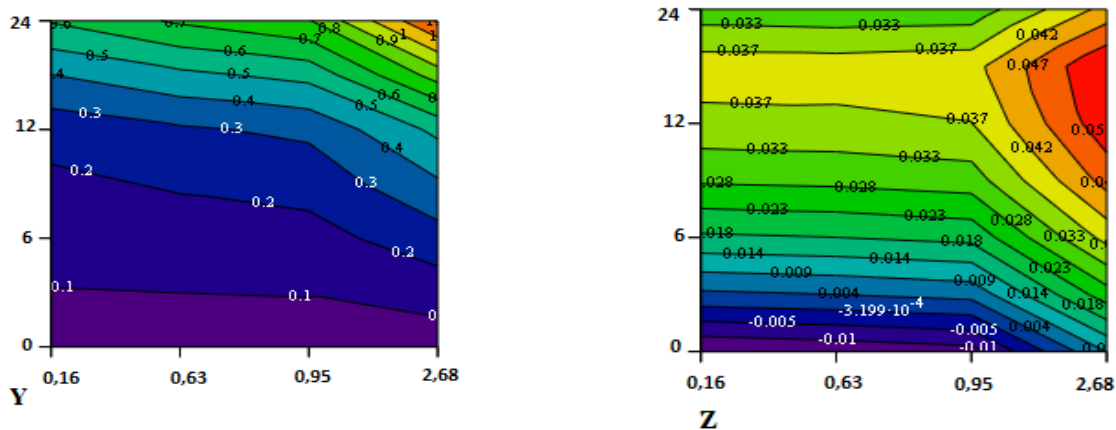


Рис. 5.11. Діаграми зміни оптичної густини (Y) та інтенсивності розвитку(Z) *E. coli* від шорсткості поверхні та часу інкубації в процесі формування біоплівки за температури $+17\pm 1^\circ\text{C}$ з початковою кількістю мікробних клітин 2–10 тис/см² площі

З рис. 5.11 (Y) видно, що кількість бактерій *E. coli* найбільшого значення набуває при шорсткості поверхні 2,68 мкм після 20 годин інкубації. При цьому швидкість розвитку (Z) *E. coli* найінтенсивніше зростає за величини шорсткості між 0,95 мкм і 2,68 мкм та часу, починаючи після десятигодинної інкубації.

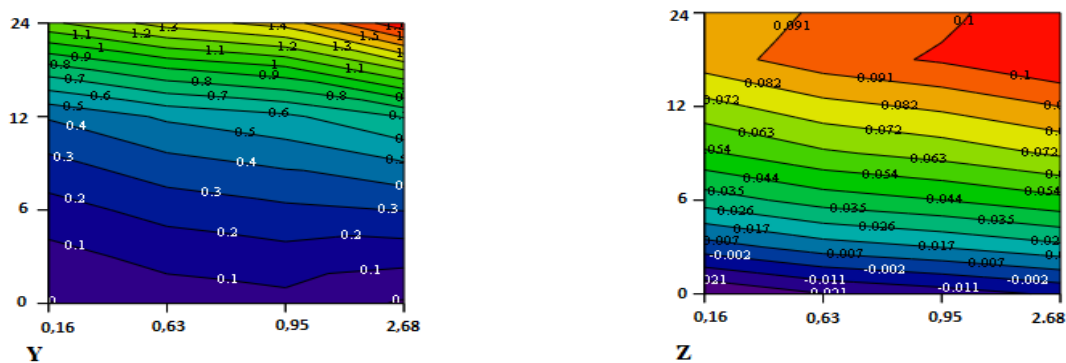


Рис. 5.12. Діаграми зміни оптичної густини (Y) та інтенсивності розвитку(Z) *E. coli* від шорсткості поверхні та часу інкубації в процесі формування біоплівки за температури $+25\pm 1^\circ\text{C}$ з початковою кількістю мікробних клітин 2–10 тис/см² площі

З аналізу рисунку 5.12 видно, що аналогічні тенденції щодо кількості бактерій та інтенсивності їх зростання, як і за температури $+17\pm 1^\circ\text{C}$. Проте кількість бактерій збільшується (Y) та заповнює шорсткість (Z) з 2,68 мкм до 0,63 мкм на 18 годину інкубації, а на 20 годину практично доходить до 0,30 мкм. З даних за температури $+37\pm 1^\circ\text{C}$ кількість бактерій інтенсивно зростає (Y) і

відбувається заповнення шорсткостей поверхні (Z) 2,68–0,63 мкм вже упродовж 12 годин інкубації.

На основі математичного моделювання встановлено, що спочатку адгезія і інтенсивний процес формування біоплівки *E. coli* проходить у западинах великих шорсткостей 2,68–0,95 мкм та поступово заповнює западини меншої шорсткості 0,63–0,16 мкм.

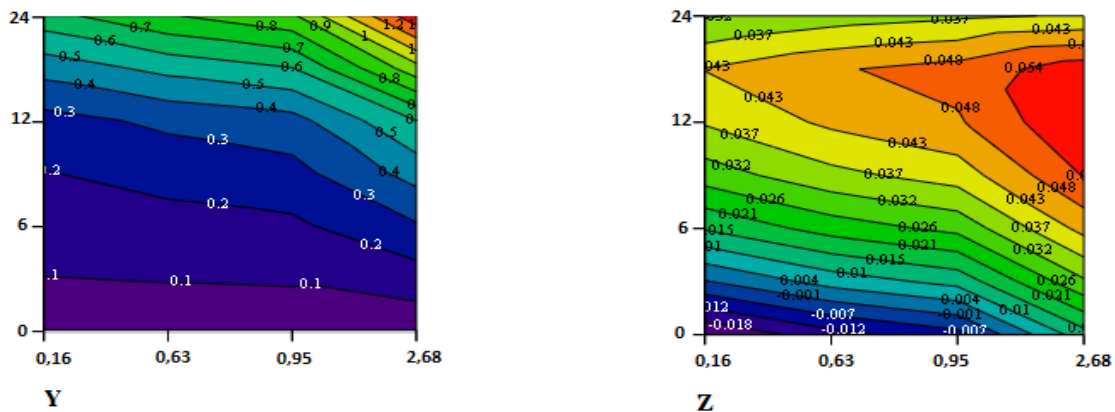


Рис. 5.13. Діаграми зміни оптичної густини (Y) та інтенсивності розвитку (Z) *E. faecalis* від шорсткості поверхні та часу інкубації в процесі формування біоплівки за температури $+17\pm 1^\circ\text{C}$ з початковою кількістю мікробних клітин 2–10 тис/см² площі

З рисунку 5.13 видно, що проходить аналогічна закономірність процесу плівкоутворення у *E. faecalis*, як у *E. coli* за цієї температури. Проте, швидкість зростання *E. faecalis* інтенсивніша, так як відбувається заповнення западин шорсткості з 2,68 мкм до 0,63 мкм на відміну від *E. coli* до 0,95 мкм.

Процес плівкоутворення у *E. faecalis* за температури $+37\pm 1^\circ\text{C}$, на поверхні з різною шорсткістю проходив інтенсивніше, порівняно з *E. coli*, тобто швидкість заповнення усіх западин шорсткості відбувалося на 12 годину.

Отримані дані вказують на високу достовірність щодо залежності щільності біоплівок від початкової кількості мікробних клітин на поверхні сталі. Виявлено, що чим більш контамінована поверхня мікроорганізмами, тим швидше проходить процес плівкоутворення і формування щільних біоплівок.

Встановлено, що крім шорсткості поверхні на процес формування біоплівки впливає форма і розмір клітин мікроорганізмів. Це пов'язано з тим, що за шорсткості 0,95 і 0,63 мкм кокові форми мікроорганізмів інтенсивніше формували біоплівки, ніж паличковидні так як це явище пов'язано із збільшенням площі контакту бактерій з поверхнею.

Процес формування біоплівки *E. coli* на нержавіючій сталі, залежав від шорсткості поверхні та початкової кількості мікробних клітин на поверхні. Щільність сформованих біоплівок за початкової кількості клітин *E. coli* до 1 тис. на см² площі була в середньому в 1,8–2,2 раза ($p \leq 0,05$) нижчою, порівняно з біоплівкою сформованою на поверхнях з початковою кількістю мікробних клітин 2–10 тис. та 20–50 тис. на см² площі сталі. Це вказує на те, що для попередження формування біоплівок високої щільності необхідно проводити ретельну санітарну обробку молочного обладнання.

Встановлено, що при сприятливій температурі *E. faecalis* упродовж 9–12 год. здатний формувати біоплівки середньої та високої щільності на поверхні нержавіючої сталі з шорсткістю $0,955 \pm 0,092$ мкм. Проте щільність біоплівок за початкової кількості клітин *E. faecalis* до 1 тис. на см² площі була в середньому в 1,5–2,1 раза ($p \leq 0,05$) нижчою, порівняно з біоплівкою сформованою у варіантах з початковою кількістю клітин 2–10 тис. та 20–50 тис. на см² площі сталі.

Висновки. Провівши аналіз наукової літератури, щодо адгезії мікроорганізмів і формування біоплівок на технологічному обладнанні переробних підприємств можна відзначити наступне. Формування мікробних біоплівок на технологічному обладнанні переробних підприємств створює серйозну проблему, адже вони є джерелом забруднення продуктів мікроорганізмами, підвищують корозію металу, погано видаляються мийними і дезінфікуючими засобами, що в кінцевому результаті призводить до економічних втрат. Крім того, дані літератури вказують, що поверхня нержавіючої сталі технологічного обладнання галузі, а саме її шорсткість, топографія відіграють ключову роль у процесі мікробної адгезії та у подальшому формуванні біоплівок. Однак, на даний час достеменно не з'ясовано, вплив різної шорсткості поверхні нержавіючої сталі на процес мікробної адгезії і формування щільних біоплівок, що залежать від фізіологічних і морфологічних особливостей мікроорганізмів, які контамінують обладнання.

У науковій літературі обмаль даних про вплив температури навколишнього середовища і періоду часу упродовж якого на обладнанні формуються щільні біоплівки, які є стійкі до засобів санітарної обробки. Проведення досліджень у такому напрямку дозволять науково обґрунтувати параметри шорсткості поверхні технологічного обладнання галузі, які б максимально знижували процес мікробної адгезії, а також стали підґрунтям для розробки способу оцінки нержавіючої сталі на предмет її протиадгезивних властивостей. Крім того, дозволять математично змоделювати залежність

процесу півкоутворення на нержавіючій сталі з різною шорсткістю поверхні від кількісного початкового вмісту бактерій на поверхні та їх морфології і розмірів.

Згідно проведеного аналізу формування мікробних біоплівки на технологічному обладнанні галузі й методики гігієнічної обробки їх поверхонь, встановлення режимів проведення миття, зроблено аналіз у вирішенні питань по якісному проведенні санітарної обробки технологічного обладнання.

Список використаної літератури

1. Kukhtyn M., Berhilevych O., Kravcheniuk K., Shynkaruk O., Horiuk Y., Semaniuk N. (Formation of biofilms on dairy equipment and the influence of disinfectants on them. Eastern-European journal of Enterprise Technologies, 2017. № 5/11. No. 89, P. 26–33.
2. Shaheen R. Persistence strategies of *Bacillus cereus* spores isolated from dairy silo tanks. Food Microbiology, 2010. № 27 (3), P. 347–355.
3. Verran J., Packer A., Kelly P., Whitehead K. A. The retention of bacteria on hygienic surfaces presenting scratches of microbial dimensions. Letters in Applied Microbiology, 2010. № 50, P. 258–263.
4. Whitehead K. A., Verran J. The effect of surface properties and application method on the retention of *Pseudomonas aeruginosa* on uncoated and titaniumcoated stainless steel. Int Biodeterior Biodegradation, 2007. № 60. P. 74–80.
5. Mo`ker N., Dean R. C. *Pseudomonas aeruginosa* increases formation of multidrug-tolerant persister cells in response to quorum-sensing signaling molecules. J. Bact. 2010. Vol. 192. No 7. P. 1946–1955.
6. McDougald D., Srinivasan S. Signal-mediated cross-talk regulates stress adaptation in *Vibrio* species. Microbiol. 2003. Vol. 149. No 7. P. 1923–1933.
7. Karatan E., Watnick P. Signals, regulatory networks, and materials that build and break bacterial biofilms. Microbiol. Mol. Biol. Rev. 2009. Vol. 73. No 2. P. 310–347
8. Yi K., Rasmussen A. W. Gudlavalleti S. K. et al. Biofilm formation by *Neisseria meningitidis*. Infect. Immun. 2004. Vol. 72. P. 6132–6138.
9. Beveridge T. J. Visualizing bacterial cell walls and biofilms. Microbe. 2006. V. 1. No 6. P. 1–6.
10. Diamond-Hernandez B., Solórzano-Santos F., Leños-Miranda B. et al. Production of icaADBC encoded polysaccharide intercellular adhesin and therapeutic failure in pediatric patients with staphylococcal device-related infections. BMC Infect. Dis. 2010. No 10. P. 68–74.

11. Gotz F. Staphylococcus and biofilms. *Mol. Microb.* 2002. Vol. 43. No 6. P. 1367–1378.
12. Zogaj X., Bokranz W. Production of cellulose and curli fimbriae by members of the family Enterobacteriaceae isolated from the human gastrointestinal tract. *Infect. Immun.* 2003. Vol. 71. P. 4151–4158.
13. Kania R. E., Lamers G. E. M., Vonk M. et al. Demonstration of bacterial cells and glycocalyx in human tonsils. *Arch. Otolaryngol.* 2007. Vol. 133. P. 115–121.
14. Kolari M. Attachment mechanisms and properties of bacterial biofilms on nonliving surfaces. Academic Dissertation in Microbiology. University of Helsinki. 2003.
15. Langsrud S., Moen B., Møretørø T. Microbial dynamics in mixed culture biofilms of bacteria surviving sanitation of conveyor belts in salmon processing plants. *Journal of Applied Microbiology.* 2016. Vol. 120 (2). P. 366–378. DOI: 10.1111/jam.13013.
16. Jullien C., Bénézech T., Carpentier B., Lebret V., Faille C. (2003). Identification of surface characteristics relevant to the hygienic status of stainless steel for the food industry. *J. Food Eng.* No. 56. P. 77–87.
17. Dantas L. C., Silva-Neto J. P., Dantas T. S., Naves L. Z., Neves F. D., Mota A. S. Bacterial adhesion and surface roughness for different clinical techniques for acrylic polymethyl methacrylate. *Int. J. Dent.* 2016. 6 p.
18. Kukhtyn M., Vichko O., Berhilevych O., Horyuk Y., Horyuk V. Main microbiological and biological properties of microbial associations of «*Lactomyces tibeticus*». *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 2016. № 7 (6), P. 1266–1272.
19. Dou X. Q., Zhang D., Feng C., Jiang L. Bioinspired hierarchical surface structures with tunable wettability for regulating bacteria adhesion. *ACS Nano*, 2015. № 9. P. 10664–10672.
20. 93/43/EEC Council directive on the hygiene of foodstuffs: European legislation governing food hygiene regulations. *Official Journal of the European Communities*. No. 175 (1).

РОЗДІЛ 6

СУЧАСНІ КОНСТРУКТИВНІ Й ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ВАЛКОВОГО ВУЗЛА НАГНІТАННЯ

Відомо [1, 3], що прискорені способи приготування і формування тіста дозволяють швидко розгортати і скорочувати виробництво і тим самим створюють умови для постачання населення якісними бубличними виробами і переведення підприємств на роботу в одну і дві зміни. Тому численні 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 розробці асортименту нових бубличних виробів слід враховувати також особливості харчування дітей, осіб середнього та похилого віку, а також умови праці працюючих у різних галузях виробництва, що проживають у різних кліматичних районах країни.

Для забезпечення та підвищення біологічної цінності виробів особливу увагу звернено на надійність роботи технологічного обладнання. Дія валків на середовище знаходиться у співвідношенні найбільш сприятливих для їх оптимальних впливів. Крім того, вони якісно транспортують, розкачують та направляють оброблювальне середовище. При підготовці та організації роботи підприємства дуже важливо вибрати технологічне обладнання та технологічний процес приготування тіста з подальшим формуванням виробів, який би забезпечував швидке припинення роботи і оперативний її початок. 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.

На основі аналізу принципів управління складними технологічними комплексами нами визначені перспективні напрямки розвитку систем управління стабільності розкачування валками на основі інженерного підходу до конструктивних параметрів. Удосконалити принципи управління можливо за рахунок використання мобільності управління процесу в робочій камері з валковими робочими органами. Мобільність ґрунтується на основі створення більш досконалих поверхонь валків та принципів технологічного процесу

нагнітання, розкачування, а також управління параметрами із застосуванням керованих механізмів – частоти обертання валків, тривалості їх дії, температурних режимів, дискретно – імпульсного впливу. Тому розробка принципів управління технологічними процесами стадійності розкачування, формування на основі конструктивних параметрів нових конструкцій валків, сприятиме підвищенню продуктивності, зменшенню питомих втрат і витрат ресурсів та сировини, поліпшенню якості продукції.

Характерною особливістю нових валків є те, що під дією екстремальних умов у вузлі нагнітання машини можливі часткові зміни структурного складу компонентів і процес цих змін суттєво не 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 розроблені конструкції валків й вузлів нагнітання формувальних, тістоподільних машин повною мірою відповідають вимогам якості технологічного процесу. Цей ефект базується величиною сили тертя між середовищем і поверхнею валків, яка мінімізована.

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.

Отже, одержання необхідного результату безпосередньо залежить від принципового підходу до постановки проблеми й визначення шляху її реалізації. Розвиток конструктивних і технологічних параметрів нагнітання тіста багато в чому залежить не тільки від застосування досконалих методів деформації, але й від їх різноманіття. Тому в монографії у розділі 7 подано усі нові розробки щодо конструювання машин з валковими робочими органами.

6.1. Особливості конструкцій гвинтових конвейєрів для транспортування середовищ

Успішне вирішення задач проектування обладнання починається з використання системи конструкторської документації, вивчення стандартів і вмілого застосування довідкової літератури. Сучасні тенденції прогресу базуються на системному підході в рішенні важливого комплексу оптимізаційних задач, що можуть бути сформульовані у вигляді графічних або функціональних залежностей. Створення нової конструкції починається з використання елементів геометричного моделювання поверхні. Як правило, початковим етапом є визначення (обмеження) робочого простору від якого залежить результати технологічного процесу транспортування. Робочий простір в сучасних робочих камерах машин є визначеної форми, розмірів, що розраховані до технологічних умов, економічних можливостей і подальшої ціленаправленої експлуатації.

Робочі органи формувальних машин, крім забезпечення вищої форми автоматизму та неперервності, повинні задовольняти ще одну вимогу: економічної доцільності використання, тобто мати мінімальну вартість на одиницю продуктивності. Ця вимога відноситься до внутрішньої структури вузла нагнітання та характеризується відношенням вартості робочих органів (інструмента) до його загальної вартості. Тому це є обов'язковою умовою переходу до нового рівня його продуктивності.

Крім цього в сьогоденних умовах необхідно використовувати удосконалені ресурсозберігаючі технології і комплектувати виробничі процеси обладнанням, що ефективно працює. Значну увагу необхідно звертати при їх проектуванні, що мають функції транспортування напівфабрикатів з валковими, шнековими робочими органами. Відповідно необхідно шукати напрямки ресурсозберігаючого, конструктивно-геометричного оформлення та експлуатаційної надійності. На наступних етапах необхідно враховувати умови екологічної безпеки, можливості обслуговування контролю технологічного стану при експлуатації, ремонтпридатності окремих вузлів. Конструктивно-геометричні складові є основою проектування обладнання та знаходяться в постійному пошуку досконалих форм робочих поверхонь [14].

При проектуванні або модернізації технологічного обладнання неможливо передбачити кінцевий результат якості дії робочих органів за допомогою існуючої технології. Вибір того чи іншого робочого органу відбувається

інтуїтивно, після чого здійснюється перевірка доцільності цього вибору за допомогою експериментальних досліджень [1, 2].

Конструктивна розробка деталей і вузлів технологічного обладнання для галузі з метою забезпечення довговічності і зносостійкості повинна проводитись з урахуванням:

- раціональної схеми роботи вузлів, їх конфігурації та розмірів з точки зору впливу на зносостійкість;
- раціонального вибору матеріалів для виготовлення деталей з урахуванням впливу на них технологічних середовищ;
- доцільного розрахунку і вибору кінематичних і силових параметрів навантаження елементів контактної взаємодії.

Встановлено [7], що при однаковій частоті обертання робочого органу та з різною масою завантаження робочої камери, швидше досягається транспортування з необхідним рівнем однорідності при великій площі контакту. Ускладнення геометрії поверхонь, а саме, наявність різних конструктивних переходів, приводить до появи негативних моментів – появи мертвих зон в робочій області камери, що погано впливає на якість процесу.

Для визначення зони якісного транспортування середовища часто використовують математичне та комп'ютерне моделювання, що визначає комплекс параметричних ефектів, побудованих на основі внутрішніх характеристиках обладнання. Дослідження методом моделювання геометричних поверхонь з їх подальшою апробацією дозволяє вирішувати задачі в широкому багатофакторному діапазоні. На основі концепції теоретичних досліджень існують розроблені методики визначення раціональних конструктивно–технологічних параметрів транспортування у машинах з різними робочими органами. Вони враховують конструктивні параметри робочої камери і робочих органів, розрахунок кінематичних параметрів руху дисперсного середовища, розподілення в ньому напружень, тиску та інших параметрів.

Розробка адекватних методів рішення таких крайових завдань вимагає встановлення й вивчення досить повного набору ефектів транспортування в елементах обладнання, так як вони мають специфічні особливості прояву й вимагають подальшого вивчення з метою правильного їхнього обліку. Зазначені методи можуть бути покладені в основу руху, принципу дії, приладів і технологій.

З урахуванням того, що можливість оцінки обмежується недостатніми існуючими статистичними даними, тому необхідно забезпечити максимальну

надійність машини шляхом підвищення якості та ефективності проектування, а також його випробовування і виробництво.

Задачі оптимізації параметрів функціонування машини по її вибраному критерію якості при дотриманні ряду обмежень можуть бути вирішені самостійним методом, за умови необхідних моделей. Завдання оптимізації параметрів полягає у детальному вивченні процесів з вибором аналітичних методів за умов наявності необхідних моделей. При цьому необхідно враховувати цілий ряд факторів, що роблять вплив на проходження процесів.

Рух середовища, утвореного робочим органом, визначається основними параметрами: формою і величиною поверхні деформації, обсягом простору робочої камери. Цю умову можна пояснити формою спірального робочого органу. У місці його дії середовище хвилеподібно деформується. Новоутворена, таким чином, хвиля деформації має форму і величину поверхні, а також об'єм нею обмеженого простору. Це свідчить про те, що деформації на поверхні середовища можна утворювати не тільки при обертовому русі, але й при поступальному русі робочого органу.

При різних режимах переміщення середовища (особливо в'язкого) розглядається результат двох процесів: переносу досить великого його об'єму з направленим потоком і прикладених до нього пульсуючих рухів різних масштабів. Напрямок у швидкості цих рухів змінний, як в часі, так і в просторі. Тому пульсуючий рух і їх інтенсивність безпосередньо зв'язані із характеристикою течії, так як зміна швидкості по величині і напрямку має хаотичний характер і потік представляє собою сукупність невпорядкованих рухів різної величини. Невпорядкований характер руху елементів середовища в потоці, постійна наявність в ньому незатухаючих коливань, визначає високу інтенсивність обміну енергії, маси та імпульсу в усіх напрямках.

Основним елементом конструкції обладнання з вузлом нагнітання є циліндрична поверхня робочої камери, в якій створюються рухи середовища. Картина руху створюється в результаті плавного переміщення середовища в робочій камері відносно певного обертового центру дії робочого органу в поздовжньому та поперечному напрямках. При цьому суміш переміщується відносно сусідньої з деяким зсувом по фазі. В загальному випадку при дії обертового робочого органу процес транспортування формується повздовжніми деформаціями транспортуючої поверхні середовища. Конфігурація деформації, її транспортні можливості визначаються параметрами обладнання.

За формою робочі органи для транспортування в'язкого середовища бувають циліндричні, конічні, зі змінним або постійним кроком. Особливу увагу

можна приділити формі поверхні робочого шнека. Вона залежить від умов роботи, виду транспортуючого середовища і розміру та геометрії транспортування. Основний напрям у вдосконаленні конструкцій робочого шнека пов'язаний з забезпеченням ним надійного рівномірного транспортування середовища до відповідного технологічного обладнання на лінії виробництва продукції. Для цієї мети, зокрема в тістоподільних машинах, виконують останній виток шнека з виступом, що є продовженням витка, який дозволяє рівномірно нагнітати тісто в подільну головку (рис. 7.1). Наявність виступу сприяє інтенсивнішому подаванню тіста, перешкоджаючи при цьому прокручуванню його навколо вала-шнека.

З аналізу даних літературних джерел та досліджень підприємств кондитерської промисловості [3, 4] впливає, що якість виконуваної роботи валками залежить від комплексу параметрів, які можна поділити на наступні категорії:

- форма, кінематика, стан і геометричні параметри валка;
- фізико-хімічні властивості середовища;
- експлуатаційні умови роботи: зазор між валками, зусилля взаємного стискання середовища, частота їх обертання;
- особливості тертя в рідких електропровідних середовищах.

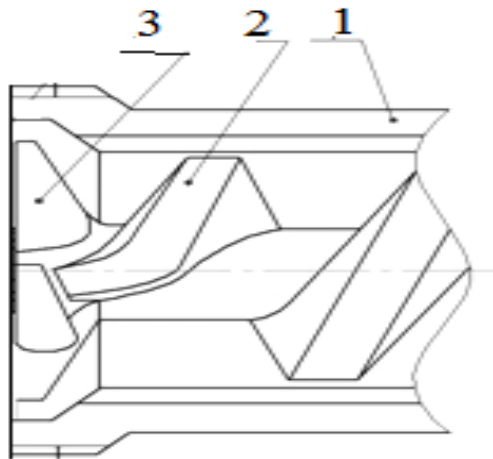


Рис. 6.1. Вузол нагнітання: 1 – робочий циліндр; 2 – шнек; 3 – виступ

Оригінальним способом транспортування оброблюваного тіста є транспортуючий механізм, поданий на рис. 6.2. Транспортуючий шнек виконаний у вигляді стрічкової спіралі з кроком, що зменшується, закріпленій на внутрішньому витку з кроком, що збільшується у напрямі транспортування

матеріалу. Причому, у зоні завантаження транспортуючий шнек і стрічкова спіраль утворюють принаймні один суцільний виток. При роботі матеріал в міжвитковому просторі транспортуючого шнека навантажуються вигинаючими силами. За рахунок зачеплення за реборди внутрішнього витка і різниці кроків гвинта та стрічкової спіралі матеріал переміщується з додатковим перемішуванням. У міру зменшення кроку стрічкової спіралі найбільш великі частки матеріалу витісняються в об'єм витків внутрішнього гвинта з кроком, що збільшується. Таким чином, процес попереднього перемішування матеріалу здійснюється по усій довжині транспортуючого шнека. Суцільний виток, утворений на вході в нагнітальну частину корпуса, запобігає зворотному потоку матеріалу.

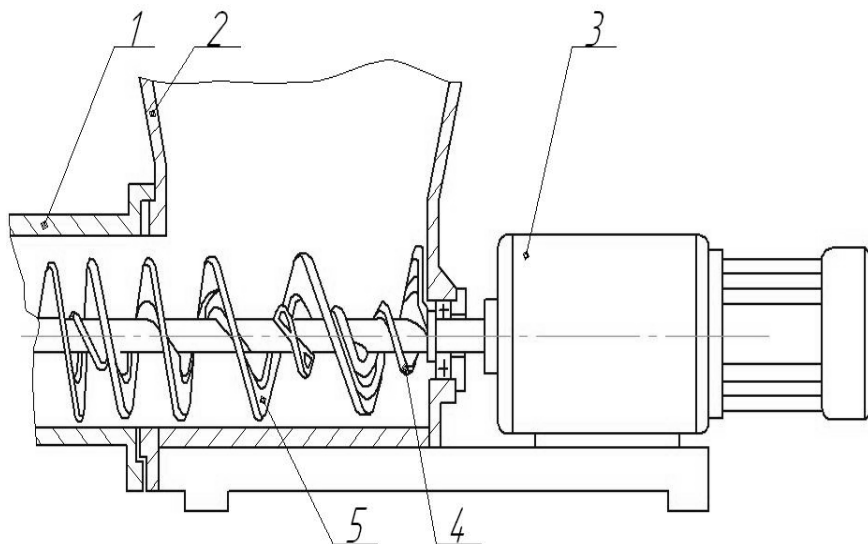


Рис. 6.2. Транспортуючий механізм: 1 – корпус; 2 – бункер; 3 – привід; 4 – внутрішня навивка шнека; 5 – стрічкова спіраль

З розвитком хлібопекарської промисловості до транспортуючих пристроїв стали пред'являтися нові вимоги, які пов'язані із якістю структури тіста. Тому основною вимогою залишається спрямованість сучасних конструкцій на забезпечення автоматично регулювати режиму роботи машини під час обробки напівфабрикату. З цією метою здійснюється контроль параметрів.

Як показано на рис. 6.3, тісто ковзає по гвинтовій поверхні уздовж вала (стрілка б), при цьому частина продукту починає зісковзувати по цій поверхні до отворів.

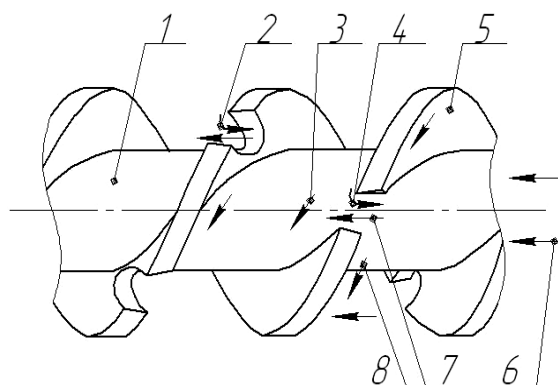


Рис. 6.3. Схема переміщення робочим шнеком середовища:
 1 – робочий шнек; 2, 3, 6, 7, 8 – напрямки переміщення середовища;
 4 – отвори; 5 – гвинтова поверхня

Далі відбувається розділення потоків. Одна частина середовища проходить через ці отвори і транспортується далі гвинтовою поверхнею (стрілка 8), тоді як інша частина перетікає через наскрізні отвори (стрілка 7).

Середовище у напрямі, вказаному стрілкою 7, поступає за виток і починає переміщуватись далі (стрілка 3). Після того, як продукт виявився на іншій стороні витка гвинтової поверхні, знову відбувається розділення потоків, при цьому одна його частина захоплюється і переміщується далі, а інша (стрілка 2) перетікає назад, зісковзуючи по гвинтовій поверхні через отвір.

Таким чином, різнорідні види сировини, переміщаючись з подібним неодноразовим розділенням і зміною напрямку течії під час процесу транспортування, неодноразово змішуються. Внаслідок цього виникає гомогенна суміш, що в різній степені впливає на якість кінцевої продукції.

Визначення максимального навантаження приводу при навантаженні робочого органу після розгону двигуна може бути визначено за формулою:

$$M \frac{2(Mc_{2\max})}{I_1 + I_{2c\ 2\max}}$$

де M_{\max} – максимальний приведений момент тертя по поверхні;

M_c – наведений статичний момент;

I_1 – приведений момент інерції частини середовища, яка починає рухатися після включення двигуна;

I_2 – приведений момент інерції веденого елемента машини (шнек та ін. роб. орган).

У формулі, яка визначає M_{2max} передбачається, що на початковий момент транспортування, момент тертя на поверхні обочого органу плавно наростає до величини M_c . При цьому ведена маса нерухома (проковзує). Після досягнення моменту тертя, рівного M_c , починається рух веденої маси I_c . Система уподібнюється двом масам (ведучої і веденої), сполучених пружною ланкою жорсткості C . Прикладений зовнішній момент – максимальний момент тертя M_{max} . Жорсткість наведеної системи C являє собою жорсткість елементів шнека між зчепленням з середовищем і веденою масою I_2 .

Після початку руху всієї системи її рух може бути записано у вигляді диференціальних рівнянь:

$$I \frac{d^2 \phi_1}{dt^2} + (\phi_1 - \phi_2)C = M_{max}$$

$$I \frac{d^2 \phi_2}{dt^2} - (\phi_1 - \phi_2)C = -M_{max},$$

де ϕ^1 і ϕ^2 – координати мас I_1 і I_2 .

Загальне рішення цих рівнянь відносно $(\phi^1 - \phi^1) C$ має вигляд

$$M_2 = A \sin \sqrt{\frac{C(I_1 + I_2)}{I_1 I_2}} t + B \cos \sqrt{\frac{C(I_1 + I_2)}{I_1 I_2}} t + \frac{(M_{cmax} I_2)}{I_1 + I_2 c},$$

де A і B – постійні інтегрування.

Оскільки на початку руху веденої маси пружна ланка була навантажена моментом M_c , приймаємо: при $t=0$, $M_2=M_c$ та змінення M_2 у часі $\frac{dM_2}{dt}$ вважаємо рівним нулю (при $t=0$).

Підставляючи ці умови в написане вище рівняння, отримаємо

$$M_2 = \frac{(M_{max} - M_c) I_2}{I_1 + I_2} \left[1 - \cos \sqrt{\frac{C(I_1 + I_2)}{I_1 I_2}} t \right] + M_c$$

Явно, при $\cos \sqrt{\frac{C(I_1 + I_2)}{I_1 I_2}} t = -1$ матиме максимальне значення

$$M \frac{2(Mc_{2\max})}{I_1 + I_{2c} \ 2\max}$$

При ударному додатку статичного навантаження (поштовх) після розгону робочого органу максимальний розрахунковий момент може бути визначений за формулою:

$$M_{3\max} \approx \omega \sqrt{I_2 C} + M_{c\text{кгсм}},$$

де ω – кутова швидкість частини середовища, що рухається при зустрічі її з ударним тілом у 1/сек.;

I_2 – приведений (до місця зіткнення) момент інерції веденого елемента середовища;

C – приведена (до місця зіткнення) жорсткість передачі між витками і веденим елементом середовища.

Отримані розрахункові залежності для визначення параметрів переміщення тіста в каналах, обмежених круговими направляючими, можуть використовуватися при створенні живильних пристроїв вузла нагнітання в різних галузях харчової промисловості.

6.1.1. Інженерний розрахунок. Визначення геометричних параметрів і частоти його обертання

Базові геометричні параметри шнека рис. 7.4: зовнішній діаметр D , діаметр вала d , крок b і глибина нарізки h , кут нахилу гвинтової нарізки ϕ , ширина гребеня витка e , величина радіального зазору між гребенем нарізки і корпусом циліндра δ .

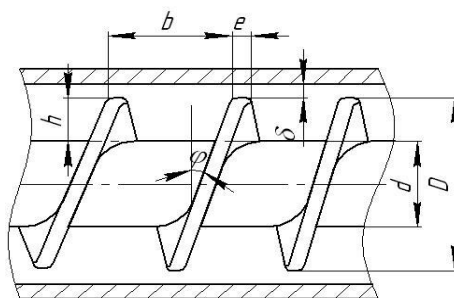


Рис. 7.4. Геометричні параметри шнека

За початковий параметр для розрахунку приймається діаметр шнека D . Якщо діаметр шнека не заданий, то його орієнтовно можна визначити за формулою:

$$Q = 0,68D^{2,5}$$

де Q – об’ємна продуктивність машини, м³/с;

D – діаметр шнека, м.

Отримане значення діаметра шнека округляється до найближчого більшого значення із стандартного ряду діаметрів шнеків.

Після вибору діаметра шнека і співвідношення L/D визначаються параметри шнека, що виражаються через його діаметр.

Крок нарізки t і глибина витка шнека h істотно впливають на продуктивність подачі тіста у вузлі нагнітання. Крок витка в зоні завантаження (затягування) залежить від коефіцієнта тертя тіста та від його характеристик. Для ідеального шнека оптимальним кутом нахилу витків є кут 45° , що відповідає кроку $b = \pi D$.

Насправді коефіцієнт тертя тіста по шнеку залежить від температури і знаходяться в межах 0,3–0,8. Значення коефіцієнта тертя 0,5 відповідає куту нахилу витків шнека 19° , тобто кроку $1,1D$.

На практиці крок гвинтової нарізки транспортуючого шнека для формувальних машин можна приймати постійним по його довжині і рівним

$$b = (0,8 \dots 1,2)D.$$

Зазвичай крок приймається рівним діаметру шнека, тобто $b = D$, що відповідає куту піднімання гвинтовою каналу $17^\circ 42'$. В цьому випадку забезпечується не лише достатньо добре живлення тістом до формувального пристрою машини, але значно спрощується технологія виготовлення шнека. Для забезпечення високих ступенів стискання тіста застосовують шнеки зі змінним по довжині циліндра кроком.

Глибина гвинтового каналу черв’яків h для транспортування тіста приймається рівною:

- в зоні завантаження (затягування)

$$h = (0,12...0,16)D$$

- в напірній зоні (нагнітання)

$$h_n = 0,5 \left[D - \sqrt{D^2 - \frac{4h}{j}(D - h)} \right],$$

де j – ступінь стиснення тіста.

Для шнеків, що транспортують тісто глибина нарізки повинна бути в межах

$$h = (0,15...0,30)D$$

При виборі товщини витка e необхідно враховувати, що її збільшення товщини витка призводить до підвищення витрати потужності, а зменшення - до зниження міцності шнека. Ширину гребеня витка шнека зазвичай приймають рівною

$$e = (0,06...0,1)D$$

Менші значення приймають для діаметрів шнеків більших 155 мм, а великі – для діаметрів менших 155 мм.

Радіальний зазор між внутрішньою поверхнею робочої камери вузла нагнітання і зовнішньою поверхнею витка шнека необхідно додержуватися:

$$\delta = (0,002...0,005)D$$

Частота обертання шнека істотно впливає на продуктивність нагнітання тіста. Зростання продуктивності відбувається до певної частоти обертання, вище якої починається нестабільний рух тіста. Це призводить до зменшення продуктивності, порушення ритму формувального пристрою, збільшення споживаної потужності і підвищеного зносу робочих частин машини та якості готової продукції. Для протидії такому обертанню на циліндрі валка роблять нарізки пазів.

Критична частота обертання транспоруючого шнека в зоні затягування тіста визначається за наступним співвідношенням:

$$n_{кр} = \frac{42,2}{60\sqrt{D}}$$

де D – діаметр шнека, м.

Частоту обертання робочих валків (шнеків) треба обмежувати для дотримання оптимальної температури нагрівання тіста та забезпечення максимального коефіцієнту тертя і усунення термомеханічної деструкції.

Робочу частоту обертання валкового шнека визначається залежністю:

$$n = (0,2 \dots 0,7)n_{кр}$$

де нижні значення числових коефіцієнтів приймають для малих діаметрів шнеків, а верхні – для великих.

6.1.2. Розрахунок продуктивності шнекових валків

Визначальний вплив на продуктивність формувальної машини має напірна зона шнека. Працездатність цієї зони залежить від геометричних параметрів. Продуктивність також залежить від конструкції нагнітального вузла.

Об'ємна продуктивність може бути розрахована за формулою:

$$Q = \frac{\alpha K}{K + \beta} n,$$

де Q – об'ємна продуктивність машини, м³/с;

K – постійна геометричної форми нагнітального вузла, м³;

n – частота обертання шнека, с⁻¹;

β – постійна прямого потоку тіста для шнеків з постійними геометричними розмірами, змінними кроком і глибиною нарізки, м³.

При розрахунках об'ємної продуктивності розглядається повна довжина нарізаної частини шнека.

6.1.3. Визначення потужності приводу

Потужність, що витрачається, може бути розрахована на підставі наявних моделей поведінки тіста в процесі його нагнітання, як сума потужностей, споживаних у зоні завантаження, нагнітальній зоні в валковому вузлі.

Потужність приводу, споживана в зоні завантаження, витрачається на подолання сил тертя при русі тіста. Величина її складає близько 10% від сумарної споживаної машиною потужності, якою можна знехтувати. Потужність, що витрачається в нагнітальній зоні витрачаються на примусове проштовхування маси тіста по гвинтовому каналу шнека N1.

Потужність в нагнітальній зоні з постійними геометричними розмірами шнека:

$$N_1 = \frac{\pi^3 \cdot D^3 \cdot n^2 \cdot \mu_{ef} \cdot l_0}{h} + \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot n \cdot h \cdot \operatorname{tg}\phi}{2} \Delta P_{гол},$$

де μ_{ef} – ефективна в'язкість тіста у гвинтовому каналі, Па;

$\Delta P_{гол}$ – перепад тиску у валковому вузлі.

Потужність у напірній зоні зі змінним кроком гвинтової нарізки:

$$N_1 = \frac{\pi^5 (d+h)^3 d^2 n^2 \mu_{ef} (\Gamma - eR)}{h} + \alpha_1 n \Delta P_{гол}$$

де Γ – коефіцієнт, який визначається за формулою:

$$\Gamma = \frac{2,3}{2\Delta b} \ln \frac{\cos^2 \phi_k}{\cos^2 \phi_n} + \frac{\pi(\phi_n + \phi_k)}{360(d+h)},$$

де ϕ_n – кут нахилу гвинтової лінії на початку нагнітальної зони по середньому діаметру;

ϕ_k – кут нахилу гвинтової лінії в кінці нагнітання по середньому діаметру.

$$\phi_n = \operatorname{arctg} \frac{b_n}{\pi(D-h)};$$

$$\phi_k = \operatorname{arctg} \frac{b_k}{\pi(D-h)}$$

Величина R визначається за формулою:

$$R = \frac{2,3}{\pi^2(d+h)^2} \ln \frac{b_{\Pi}^2 \cos^2 \phi_{\Pi}}{b_K^2 \cos^2 \phi_K} + \frac{\pi(\phi_{\Pi} - \phi_K)}{180(d-h)\Delta b}$$

Потужність при нагнітанні зі змінною глибиною гвинтового каналу шнека:

$$N_1 = \frac{\pi^5(b-e)l_0 J n^2 \mu_{\text{эф}}}{b} + \alpha_2 n \Delta P_{\text{гол}}$$

де J – коефіцієнт, що визначається за формулою.

$$J = \frac{\pi^2 D^2 - 4r^2}{2} + \frac{(d_2 + D)^3 - (d_{\Pi} + D)^3}{3(d_2 - d_{\Pi})} + \frac{2,3\pi^2 D^5}{(b^2 + \pi^2 D^2)(h_{\Pi} - h_2)} \ln \frac{h_{\Pi}}{h_2},$$

де h_{Π} – глибина гвинтового каналу на початку нагнітання, м;

h_2 – глибина гвинтового каналу на кінці шнека, м;

d_2, d_{Π} – відповідно, діаметр сердечника на кінці шнека і на початку нагнітання, м;

α_2 – постійна прямого потоку, м³.

Загальна потужність, що витрачається на просування тіста по каналу між обертовими шнековими валками:

$$N = N_1 + N_2$$

Потужність електродвигуна приводу приймається більшою від розрахункової, щоб компенсувати не враховані витрати енергії:

- на захоплення і транспортування тіста в зоні нагнітання;
- на просування тіста, в напірній зоні;
- на подолання сил тертя і осьової реакції в упорному підшипнику.

Перераховані витрати можуть бути враховані коефіцієнтом корисної дії η , який при нагнітанні тіста складає $\eta=0,2\dots0,3$. Тоді потужність електродвигуна приводу буде наступною:

$$N_{\text{заг}} = \frac{N_1 + N_2}{\eta}.$$

Після визначення потужності електродвигуна приводу приступають до вибору його типу за відповідними каталогами.

6.1.4. Зменшення маси основних деталей валків

Основна мета розрахунку полягає в тому, щоб знайти такі оптимальні геометричні параметри комплектуючих вузла нагнітання (параметри управління $x = (x_1 \dots x_i)$), які разом з характеристиками міцності і ефективним відведенням тепла забезпечували б мінімальну масу конструкції:

$$M(\bar{x}) = \rho V(\bar{x}); \sigma_{екв} = F_j(\bar{x})$$

де $M(\bar{x})$ – маса ділянки деталі одиничної довжини;

$V(\bar{x})$ – залежність об'єму конструкції деталі від параметрів управління;

$\sigma_{екв}$ – еквівалентне напруження в небезпечних перетинах деталі;

F_j – залежність еквівалентного напруження в небезпечних перетинах деталі від параметрів управління.

$$j = (1 \dots k);$$

де k – число небезпечних перетинів конструкції деталі.

У зв'язку з цим ставиться завдання: знайти вектор $x = (x_1 \dots x_i)$, який мінімізує цільову функцію, що характеризує витрату матеріалу:

$$M(\bar{x}) \rightarrow \min$$

При цьому повинні виконуватися обмеження по міцності

$$\max \sigma_{екв} \leq [\sigma]$$

i – геометричні обмеження по параметрах управління

$$a_i \leq x_i \leq b_i$$

де $i = (1 \dots k_u)$, k_u – кількість параметрів управління;

$\max \sigma_{екв}$ – максимальне еквівалентне напруження в небезпечних перетинах деталі;

$[\sigma]$ – напруження, що допускається для матеріалу деталі;

x_i – геометричні розміри деталі, які приймаються рівними;
 a_i, b_i – найменший і найбільший значення керованих параметрів;
 ρ – щільність матеріалу деталі.

Розрахунки на міцність валка виконується після попереднього вибору геометричних розмірів шнека і розрахунку технологічних параметрів. Розрахунки виконуються з урахуванням виду силового навантаження і режиму роботи. Метою розрахунків на міцність є визначення основних розмірів машини (товщина стінки циліндра, розмірів сполучних елементів, максимального прогинання шнека), вибір і розрахунок опорних елементів та ін.

Максимальний тиск $P_{\text{тах}}$ розвивається шнеком, коли маса тіста знаходиться в зоні нагнітання між валками

$$P = \frac{\alpha_i F_{\alpha} n \mu_c}{\beta_i F_{\beta}}_{\text{max}}$$

де μ_c – середня по довжині шнека в'язкість тіста, що переробляється;
 α_i і β_i – постійні прямого і зворотного потоків тіста для шнеків з постійною або змінною глибиною нарізки в нагнітальній зоні або змінним кроком;
 n – частота обертання шнека.

Значення середньої в'язкості тіста μ_c визначається з наступного співвідношення:

$$Q = \alpha_i F_{\alpha} n - \beta_i F_{\beta} \frac{\Delta P_{\text{заг}}}{\mu_c},$$

де Q – продуктивність машини;
 $\Delta P_{\text{заг}}$ – перепад тиску в нагнітальному вузлі.

Звідки

$$\mu_c = \frac{\beta_i F_{\beta} \Delta P_{\text{заг}}}{\alpha_i F_{\alpha} n - Q}$$

Максимальне осьове зусилля, що діє на шнек

$$S_{oc} = P_{max}$$

де F – площа поперечного перетину шнека

$$F = \frac{\pi D^2}{4}$$

де D – зовнішній діаметр шнека, м.

Крутний момент на черв'яку, Н·м:

$$M_{кр} = 573 \frac{N_1}{n},$$

де N_1 – потужність, що витрачається на просування маси тіста по зазору між шнеками, Вт;

n – частота обертання шнека, с⁻¹.

6.1.5. Розрахунок шнеків на міцність і жорсткість

Процеси нагнітання тіста ведуться при значному тиску, який інколи досягає 0.2 МПа, що визначає підвищені вимоги до розрахунків на міцність деталей і вузлів таких машин.

Основна вимога, що висувається до шнеків, – забезпечення найбільшої продуктивності за необхідної якості стадійності процесу і найменшої споживаної потужності, що залежать не тільки від властивостей тіста, але і від конструктивних параметрів шнека.

В даний час наявні в літературі рекомендації для проектування шнекових валків недостатні, тому що не враховують характеристик їх міцності. Наприклад, вибрана за рекомендаціями довжина l , відношення D/D_1 можуть задовольнятися вимогам продуктивності і якості технологічного процесу, але за рахунок поздовжньо-поперечного вигину шнека відбуватиметься передчасний знос циліндра, що призведе до додаткових витрат потужності.

Завданням розрахунку на міцність є перевірка попередньо спроектованого шнека і визначення максимально допустимого прогинання з метою недопущення контакту витків шнека з внутрішньою поверхнею робочої камери.

Розрахунок на міцність шнека проводиться, виходячи з максимально можливих величин крутного моменту $M_{кр}$, осьового зусилля S_{oc} і розраховують по формулах (7.1), (7.2).

Розрахунок шнека можливий у двох варіантах, залежно від його жорсткості (гнучкості):

- розглядається дія максимального осевого зусилля S_{oc} і крутного моменту $M_{кр}$ з урахуванням власної ваги шнека;
- розрахунок на поздовжньо-поперечний вигин з урахуванням максимального осевого зусилля S_{oc} і власної ваги шнека.

Для визначення варіанту розрахунку перевіряємо шнек на гнучкість за формулою:

$$\lambda_2 = \frac{k_{защ}L}{i}, \quad (6.1)$$

де λ_2 – гнучкість вала шнека;

$k_{защ}$ – коефіцієнт, залежний від способу закріплення кінців вала (в даному окремому випадку $k_{защ} = 2$);

L – довжина шнека, м;

i – радіус інерції перетину, що визначається за формулою

$$i = \sqrt{J/F}, \text{ м} \quad (6.2)$$

де $J = \pi D^4/64$, м⁴ – момент інерції поперечного перетину;

F – площа поперечного перетину шнека в перетині, м².

Після підстановки значень J і F отримаємо:

$$i = \frac{D}{4} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{D}\right)^2} \quad (6.3)$$

Тоді за формулою (7.2) знаходимо значення λ . Якщо $\lambda \gamma < 50$, то розрахунок шнека проводимо за першим варіантом, а якщо $\lambda \gamma > 50$, то за другим.

Перший варіант розрахунку. Максимальне дотичне напруження на поверхні шнека:

$$\tau M_{кр}/W_p \text{max}, \quad (6.4)$$

де W_p – полярний момент опору, м³:

$$W_p = \frac{\pi D^3}{16} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right) \quad (6.5)$$

Остаточні дотичні напруження:

$$\tau \frac{16M_{кр}}{\pi D^3 \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right)_{\max}} \quad (6.6)$$

Нормальне напруження викликається осьовою силою S_{oc} і розподіленим навантаженням q . Максимальне напруження виникатиме у місці закріплення шнека (близько першого підшипника)

$$\sigma \frac{S_{oc}}{F} \frac{M_{зг\max}}{W_{н.о.}} \quad (6.7)$$

де $M_{зг\max}$ – максимальний згинальний момент від розподіленого навантаження шнеку, Н·м;

$W_{н.о.}$ – осьовий момент опору відносно нейтральної вісі, м³:

$$M \frac{\rho g F L^2}{2} \quad (6.8)$$

де ρ – густина матеріалу шнека, кг/м³;

$g=9,81$ м/с² – прискорення вільного падіння;

F – площа поперечного перетину шнека, м².

Осьовий момент опору відносно нейтральної осі:

$$W_{н.о.} = \frac{\rho g F L^2}{8} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right) \quad (6.3)$$

Після підстановки відповідних значень і перетворень рівняння формула 6.7 прийме вигляд:

$$\sigma \frac{4S_{oc} \left(1 + \left(\frac{d}{D}\right)^4\right) + \pi \rho g D L^2 \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right)}{\pi D^2 \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right)} \quad \max \quad (6.10)$$

Умова міцності шнека за третьою теорією міцності:

$$\sigma_{\delta} = \sqrt{\sigma_{max}^2 + 4\tau_{max}^2} \leq [\sigma] \quad (6.11)$$

де $[\sigma]$ – допустиме напруження для матеріалу шнека і заданих умов його експлуатації, Н/м².

Максимальне прогинання шнека від розподіленого навантаження q :

$$\xi \frac{qL^4}{8EJ_{max}} \quad (6.12)$$

де E – модуль пружності матеріалу шнека, Н/м²;

J – момент інерції поперечного перетину шнека, м⁴.

Другий варіант розрахунку. При поздовжньо-поперечному згинанні рівняння зігнутої вісі шнека:

$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = M_{z2} \quad (6.13)$$

Рівняння згинального моменту:

$$M_{z2} = \frac{q}{k^2} (1 - \cos kx) + M_n \cos kx + \frac{Q_n}{k} \sin kx, \quad (6.14)$$

де параметр $k = \sqrt{P/EJ}$;

M_n – початкове значення згинального моменту при $x=0$;

Q_n – початкова величина поперечної сили при $x=0$, яка дорівнює:

$$Q_n = \frac{q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL\right)}{\cos kL} \quad (6.15)$$

Підставивши 6.14 значення Q_n в рівняння 6.15), отримаємо

$$M_{зз} = \frac{q}{k^2} (1 - \cos kx) + \frac{q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right)}{k \cos kL} \sin kx \quad (6.16)$$

Для визначення $M_{ззmax}$ визначимо з рівняння 6.16) максимум:

$$\frac{dM_{зз}}{dx} = \frac{q}{k} \sin kx + \frac{q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right)}{\cos kL} \cos kx = 0 \quad (6.17)$$

Після відповідних перетворень отримаємо:

$$tgkx = tgkL - \frac{kL}{\cos kL} \quad (6.18)$$

З рівняння **Ошибка! Источник ссылки не найден.** 6.18 знаходимо значення x , при якому згинальний момент $M_{зг}$ буде максимальним, і за формулою 6.17 знайдемо його величину $M_{зг тах}$.

Максимальне дотичне напруження на поверхні шнека:

$$\tau M_{кр} / W_{p_{max}} \quad (6.19)$$

З урахуванням полярного моменту опору перетину шнека максимальне дотичне напруження буде наступним:

$$\tau \frac{16M_{кр}}{\pi D^3 \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right)}_{max} \quad (6.20)$$

Максимальне нормальне напруження від максимального осьового зусилля S_{oc} і розподіленого навантаження q розраховуємо за формулою 6.7. Перевіряємо міцність шнека за умовою 6.11.

Максимальне прогинання шнека $\xi_{max_{max}}$ для другого варіанту розрахунку визначається наступним чином.

Підставимо значення згинального моменту з рівняння 6.16 в диференціальне рівняння зігнутої вісі шнека (6.18) і отримаємо:

$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{q}{k^2} (1 - \cos kx) + A \sin kx, \quad (6.21)$$

де

$$A = \frac{q \left(L - \frac{1}{k} \sin kL \right)}{k \cos kL}$$

Після подвійного інтегрування рівняння (6.21) і знаходження значень постійних інтегрування C_1 і C_2 рівняння зігнутої вісі шнека прийме вигляд:

$$EJy = \frac{qx^2}{2k^2} + \frac{q}{k^4} \cos kx - \frac{A}{k^2} \sin kx + \left(\frac{q}{k^3} \sin kL + \frac{A}{k} \cos kL - \frac{PL}{k^2} \right) x + \quad (6.22)$$

$$+ \frac{qL^2}{2k^2} - \frac{q}{k^4} \cos kL + \frac{A}{k^2} \sin kL - \frac{qL}{k^3} \sin kL - \frac{AL}{k} \cos kL$$

Максимальне прогинання шнека $\xi_{\max_{\max}}$ буде при $x=0$ і визначається за формулою:

$$\xi \frac{1}{EJ} \left[\frac{q}{k^2} \left(\frac{1}{k^2} + \frac{L^2}{2} \right) - \frac{1}{k} \left(\frac{q}{k^3} + AL \right) \cos kL - \frac{1}{k^2} \left(\frac{qL}{k} - A \right) \sin kL \right]_{\max} \quad (6.23)$$

Визначивши максимальний прогин за формулою (6.23), необхідно порівняти його величину з розрахованою і практично встановленою величиною зазору між шнеком і внутрішньою поверхнею циліндра. Отриманий прогин має бути меншим від цього зазору.

6.2. Конструкції нових валкових робочих органів

Для збільшення рівномірності транспортування тіста до формувального пристрою в машині для формування бубликів запропоновано цілий комплекс конструкцій робочих органів. Основними недоліками існуючого робочого органу подачі маси тіста є великий лобовий опір та зміна структури тіста, що створює перевитрати електроенергії та конструктивну складність при експлуатації. У результаті продуктивність усієї технологічної лінії знижується. Тому нами на основі проведених досліджень та встановлених комплексних

загальних пропозицій по удосконаленню валків та самого вузла машини, подано обґрунтоване конструктивне вирішення форми і геометрії валків. Їх вирішення ґрунтується на матеріалах розглянутих в попередніх розділах.

Опис нових валкових робочих органів різної форми. В основу корисної поставлено задачу підвищення ефективності затягування шару в'язкого тіста та підвищення ефективності на стадії його нагнітання за рахунок вдосконалення конструкції робочого органу формувальної машини, шляхом того, що у робочому органі формувальної машини вузла подачі тіста поперечний переріз являє собою фігуру правильного шестикутника з додержанням геометричних параметрів r радіуса вписаного кола та рівності його сторони t і радіуса R описаного кола, причому ця особливість описується залежністю:

$$r = \frac{\sqrt{3}}{2} t$$

де r – радіус вписаного кола, мм;

t – сторона шестикутника, мм;

R – радіус описаного кола, мм.

На графічному зображенні представлено поперечний переріз валка (рис.6.4). Робочий орган формувальної машини являє собою валок. Поперечний переріз валка являє собою фігуру, виконану у формі шестикутника 1. Рівність його сторони t 2 і радіуса R кола 3 дозволяє бути правильним, оскільки $2 \sin \frac{\pi}{6} = 1$.

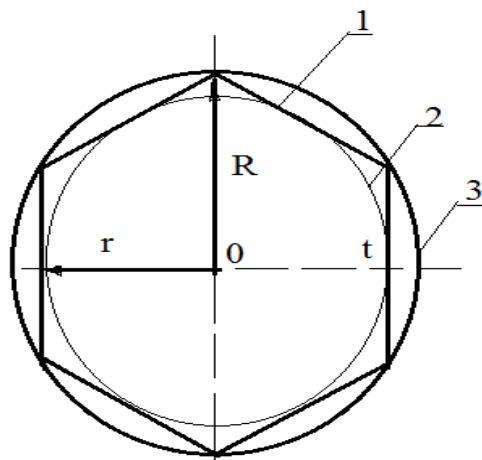


Рис. 6.4. Робочий орган вузла подачі тіста формувальної машини

Робочий орган формувальної машини працює наступним чином. У вузлі подачі маси тіста встановлено паралельно валкові робочі органи. Вмикається привід робочих валків та відбувається плавне затягування і нагнітання між ними в'язкого тіста до матриць з наступним видавлюванням через отвори насадок матриць у вигляді джгутів. Застосування валкового робочого органу у вузлі подачі формувальної машини за корисною моделлю, що пропонується, призводить до наступного. Внаслідок того, що поперечний переріз робочого валка 1 виконаного так як показано на графічному зображенні, на початковій стадії відбувається більш плавне та ефективно затягування шару в'язкого тіста з підвищенням ефективності при нагнітанні. Таке підвищення ефективності роботи обумовлено тим, що при обертанні валків відбувається плавне затягування маси без додаткового перемішування і надлишкових деформацій. В той же час при нагнітанні затягнутого в'язкого тіста робочим валком, що пропонується, обумовлює невеликі питомі витрати на подолання лобового опору при достатній ефективності видавлювання через отвори насадок.

Таким чином, наведений валковий робочий орган дозволяє організувати високоякісне транспортування і нагнітання тіста по всьому об'ємі вузла подачі без його структурної зміни при простоті обслуговування з мінімальними затратами енергії на процес формування заготовок тіста.

Основним недоліком валка у вигляді шестеренчастого насоса у вузлі подачі маси тіста є великий лобовий опір та зміна структури тіста, що створює перевитрати електроенергії та конструктивну складність при експлуатації.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення ефективності затягування шару в'язкого тіста за рахунок вдосконалення конструкції робочого органу вузла подачі тіста формувальної машини виконаного у вигляді валка, шляхом того, що валок вузла подачі тіста виконаний у вигляді шнека з конструктивними параметрами можливого кутового $d\varphi$ переміщення навколо осі x із додержанням кроку t гвинтової лінії на радіусі R з переміщенням dS тіста уздовж корпусу за повної відсутності обертання тіста навколо осі x , тобто тільки при поступальному переміщенні, причому геометричні параметри визначаються рівнянням:

$$d\varphi = \frac{2\pi}{t} dS$$

$d\varphi$ – можливе кутове переміщення шнека навколо вісі x ;

t – крок гвинтової лінії на радіусі шнека R , мм;

dS – можливе переміщення тіста уздовж корпусу за наявності обертання тіста навколо осі x .

На рис. 6.5 (а) показаний загальний вигляд валка з геометричними параметрами; на рис. 6.5 (б) – аксонометрія валкового робочого органа.

Робочий орган вузла подачі маси тіста формувальної машини (6.5 (а)) являють собою фігуру у формі шнека з можливим кутовим його переміщенням навколо вісі. Шнек по довжині має постійний крок t (мм) гвинтової лінії. Крок гвинтової лінії на відповідному радіусі R . Він виконаний з можливим переміщення тіста уздовж корпусу робочої камери за наявності обертання тіста навколо своєї осі.

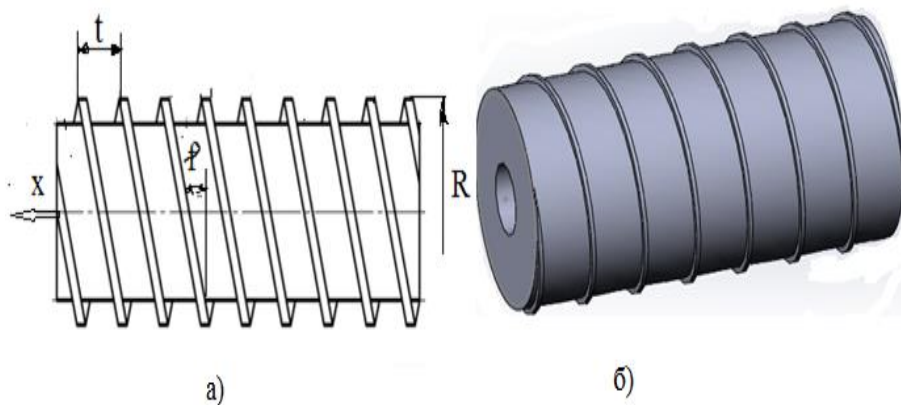


Рис. 6.5. Робочий орган вузла подачі тіста формувальної машини:
а) – розрахункова схема; б) – модель валка.

Вузол подачі маси тіста працює неперервно. Вмикається привід робочого органу (не показано) та відбувається плавне затягування і нагнітання в'язкого тіста до матриць з наступним видавлюванням через отвори насадок матриць у вигляді джгутів. Застосування валкового робочого органу у вузлі подачі формувальної машини за корисною моделлю, що пропонується, призводить до наступного. Внаслідок того, що робочий валок виконаний так як показано на рис.6.5, на початковій стадії відбувається більш плавне та ефективне затягування шару в'язкого тіста з підвищенням ефективності при нагнітанні. Таке підвищення ефективності роботи обумовлено тим, що при обертанні валка відбувається рівномірне затягування маси без додаткового перемішування і надлишкових деформацій. В той же час при нагнітанні затягнутого в'язкого тіста робочим валком, що пропонується, обумовлено невеликими питомими

витратами на подолання лобового опору при достатній ефективності видавлювання через отвори насадок.

Таким чином, наведений валковий робочий орган дозволяє організувати високоякісне транспортування і нагнітання тіста по всьому об'ємі вузла подачі без його структурної зміни при простоті обслуговування з мінімальними затратами енергії на процес формування заготовок тіста.

Основним недоліком циліндричного робочого органу з прямими пазами подачі маси тіста є великий лобовий опір та зміна структури тіста, що створює перевитрати електроенергії та конструктивну складність при експлуатації. У результаті продуктивність усієї технологічної лінії знижується.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення ефективності затягування шару в'язкого тіста та підвищення ефективності на стадії його нагнітання за рахунок вдосконалення конструкції робочого органу формувальної машини, шляхом того, що у робочому органі формувальної машини вузла подачі тіста, який виконаний у вигляді циліндричного валка, поперечний переріз являє собою фігуру з оптимальним співвідношенням параметрів, що забезпечують точну геометричну форму чотирикутника при е відхиленні сторони квадрата від ідеальної прямої окресленої радіусом R обертання біля трикутника Рьоло кола на зміщеному радіуса r , причому відхилення описується рівнянь:

$$e = r + R(\sqrt{3} - 1) - (r + R)/\sqrt{2}$$

де e – відхилення сторони квадрата від ідеальної прямої;
 R – радіус описаного біля трикутника Рьоло кола, мм;
 r – радіус, що дорівнює зміщенню OA , мм.

На графічному зображенні представлено поперечний переріз валка (рис. 6.6).

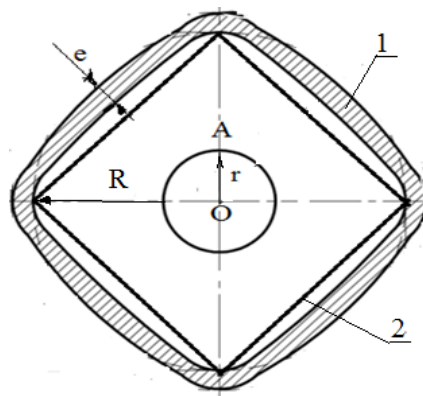


Рис. 6.6. Робочий орган вузла подачі тіста формувальної машини

Робочий орган формувальної машини являє собою валок. Такий робочий орган може бути циліндричної форми. Поперечний переріз циліндричного валка являє собою фігуру, виконану у формі чотирикутного рівновісного контуру 1. Оптимальним співвідношенням параметрів, що забезпечують точну геометричну форму чотирикутника 2 є ϵ відхилення сторони квадрата від ідеальної прямої. Відхилення окреслене радіусом R обертання біля трикутника R коло на зміщеному радіусі r .

Робочий орган формувальної машини працює наступним чином. У вузлі подачі маси тіста встановлено паралельно валкові робочі органи. Вмикається привід робочих валків та відбувається плавне затягування і нагнітання між ними в'язкого тіста до матриць з наступним видавлюванням через отвори насадок матриць у вигляді джгутів. Застосування валкового робочого органу у вузлі подачі формувальної машини за корисною моделлю, що пропонується, призводить до наступного. Внаслідок того, що поперечний переріз робочого валка 1 виконаного так як показано на графічному зображенні, на початковій стадії відбувається більш плавне та ефективно затягування шару в'язкого тіста з підвищенням ефективності при нагнітанні. Таке підвищення ефективності роботи обумовлено тим, що при обертанні валків відбувається порційне затягування маси без додаткового перемішування і надлишкових деформацій. В той же час при нагнітанні затягнутого в'язкого тіста робочим валком, що пропонується, обумовлює невеликі питомі витрати на подолання лобового опору при достатній ефективності видавлювання через отвори насадок.

Таким чином, наведений валковий робочий орган дозволяє організувати високоякісне транспортування і нагнітання тіста по всьому об'ємі вузла подачі без його структурної зміни при простоті обслуговування з мінімальними затратами енергії на процес формування заготовок тіста.

Основним недоліком валка у вигляді шестеренчастого насоса у вузлі подачі маси тіста є великий лобовий опір та зміна структури тіста, що створює перевитрати електроенергії та конструктивну складність при експлуатації. У результаті продуктивність усієї технологічної лінії знижується.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення ефективності затягування шару в'язкого тіста та підвищення ефективності на стадії його нагнітання за рахунок вдосконалення конструкції валкового робочого органу формувальної машини, шляхом того, що валок вузла подачі тіста виконаний у вигляді шнека діаметра D з додержанням геометричних параметрів

глибини гвинтового каналу h , ширини гребня витка b при кроці гвинтової нарізки t , які приймаються рівними:

$$h = (0.06 \dots 0.09)D$$

$$b = (0.04 \dots 0.06)D$$

$$t = (0.05 \dots 0.08)D$$

Робочий орган вузла подачі маси тіста формувальної машини (рис. 7.8) являють собою фігуру у формі шнека з відповідним середнім діаметром 1. Шнек по довжині має постійний крок t (мм) гвинтового каналу. Він виконаний з глибиною нарізки h (мм) 2 та шириною гребня витка b (мм) 3. Де D – середній діаметр поперечного перерізу валка, мм.

Вузол подачі маси тіста працює неперервно. Вмикається привід робочого органу (не показано) та відбувається плавне затягування і нагнітання в'язкого тіста до матриць з наступним видавлюванням через отвори насадок матриць у вигляді джгутів. Застосування валкового робочого органу у вузлі подачі формувальної машини за корисною моделлю, що пропонується, призводить до наступного. Внаслідок того, що робочий валок виконаний так як показано на рис. 7.8, на початковій стадії відбувається більш плавне та ефективно затягування шару в'язкого тіста з підвищенням ефективності при нагнітанні. Таке підвищення ефективності роботи обумовлено тим, що при обертанні валка відбувається рівномірне затягування маси без додаткового перемішування і надлишкових деформацій. В той же час при нагнітанні затягнутого в'язкого тіста робочим валком, що пропонується, обумовлено невеликими питомими витратами на подолання лобового опору при достатній ефективності видавлювання через отвори насадок.

Таким чином, наведений валковий робочий орган дозволяє організувати високоякісне транспортування і нагнітання тіста по всьому об'ємі вузла подачі без його структурної зміни при простоті обслуговування з мінімальними затратами енергії на процес формування заготовок тіста.

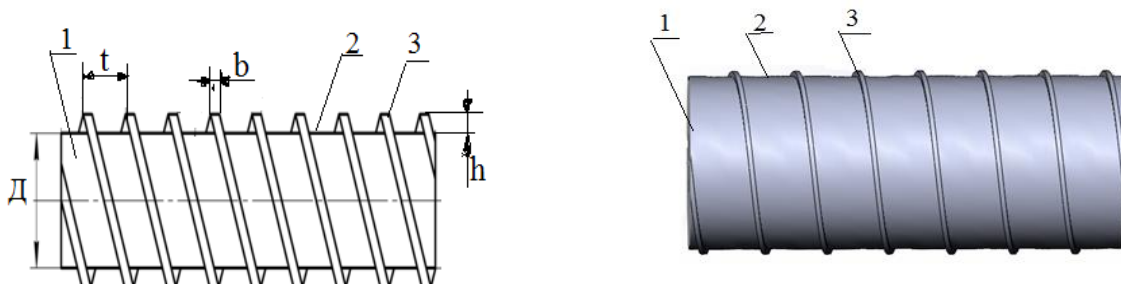


Рис. 6.8. Робочий орган вузла подачі тіста формувальної машини

Відомий робочий орган вузла подачі маси тіста машини для формування тістових заготовок, який виконаний з двох валків у вигляді шестеренчастого насоса, встановлених паралельно з можливістю проходження тіста між ними до матриць, з наступним його видавлюванням через отвори насадок матриць у вигляді джгутів (Патент України на винахід №40312 кл.А21С3/10,7/02,9/08, 2001 р.).

Валоки являють собою фігуру у формі циліндрично-гвинтових із постійним по довжині кроком гвинтових ліній виконаних у формі трикутного рівновісного контуру, а рівняння гвинтової лінії описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} z = \frac{T\varphi}{6.283} \\ x = (0.5D \pm e \cos(3\varphi)) \cos \varphi - 3e \sin(3\varphi) \sin \varphi \\ y = (0.5D \pm e \cos(3\varphi)) \sin \varphi - 3e \sin(3\varphi) \cos \varphi \end{cases}$$

де D – середній діаметр поперечного перерізу валка;

φ – кутовий параметр рівновісного контуру;

e – константа;

x, y – координати трикутного рівновісного контуру відповідно по осях x, y Декартової системи координат.

На рис. 6.9(а) показаний загальний вигляд вузла подачі формувальної машини, на 6.9(б) – загальний вигляд робочого органа.

Робочі органи вузла подачі маси тіста формувальної машини встановлені паралельно з можливістю проходження тіста між ними до матриць, з наступним його видавлюванням через отвори насадок матриць у вигляді джгутів (рис. 7.9).

Початок Декартової системи координат розміщений у центрі трикутного рівновісного контуру.

Вузол подачі маси тіста працює неперервно. Тісто 2 завантажується в бункер 1 з якого самовільно поступає у вузол подачі 3, в якому встановлено паралельно робочі органи 4. Вмикається привід робочих органів (не показано) та відбувається плавне зтягування і нагнітання між ними в'язкого тіста до матриць з наступним видавлюванням через отвори насадок матриць у вигляді джгутів. Застосування валкових робочих органів у вузлі подачі формувальної машини за корисною моделлю, що пропонується, призводить до наступного. Внаслідок того, що робочі валки 4 виконані так як показано на рис. 7.9, на початковій стадії

відбувається більш плавне та ефективно зтягування шару в'язкого тіста з підвищенням ефективності при нагнітанні. Таке підвищення ефективності роботи обумовлено тим, що при обертанні валків відбувається рівномірне зтягування маси без додаткового перемішування і надлишкових деформацій. В той же час при нагнітанні зтягнутого в'язкого тіста між робочими валками, що пропонуються, обумовлює невеликі питомі витрати на подолання лобового опору при достатній ефективності видавлювання через отвори насадок.

Таким чином, наведені валкові робочі органи дозволяють організувати високоякісне транспортування і нагнітання тіста по всьому об'ємі вузла подачі без його структурної зміни при простоті обслуговування з мінімальними затратами енергії на процес формування заготовок тіста.

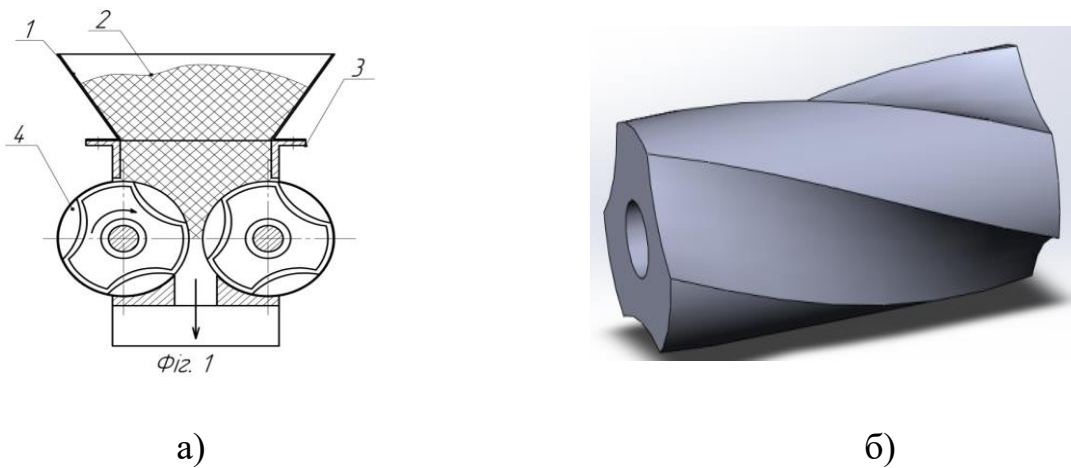


Рис. 6.9. Вузол подачі тіста формувальної машини

а) 1 – бункер; 2 – тісто; 3 – робоча камера; 4 – валок б) робочий орган

Основним недоліком валка у вигляді шестеренчастого насоса у вузлі подачі маси тіста є великий лобовий опір та зміна структури тіста, що створює перевитрати електроенергії та конструктивну складність при експлуатації.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення ефективності зтягування шару в'язкого тіста та підвищення ефективності на стадії його нагнітання за рахунок вдосконалення конструкції робочого органу вузла подачі маси тіста машини для формування тістових заготовок виконаного у вигляді валка, шляхом того, що валок виконаний у вигляді шнека середнього діаметра D із змінним кроком гвинтового каналу з геометричними параметрами глибини гвинтового каналу h в зоні зтягування та глибини гвинтового каналу h_n в зоні нагнітання при додержанні відповідного ступеня стискання тіста j , причому геометричні параметри приймаються рівними: в зоні зтягування:

$$h = (0.06...0.09)D$$

$$\text{в зоні нагнітання } h_n = 0.5 \left[D - \sqrt{D^2 - \frac{4h}{j} (D - h)} \right]$$

де D – середній діаметр поперечного перерізу валка, мм;
 h – глибина гвинтового каналу в зоні затягування, мм;
 h_n – глибина гвинтового каналу в зоні нагнітання, мм;
 j – ступінь стиснення тіста.

На рис. 6.10(а) – показаний загальний вигляд валка з геометричними параметрами; на рис. 6.10(б) – аксонометрія валкового робочого органу.

Робочий орган вузла подачі маси тіста формувальної машини являє собою фігуру у формі шнека з відповідним діаметром D . Шнек по довжині має змінний крок гвинтового каналу. Глибина гвинтового каналу h в зоні затягування 2 тіста має свої значення, а глибин гвинтового каналу h_n в зоні 3 нагнітання – свої. Ця глибина додержується при відповідному ступені стискання тіста j . Вузол подачі маси тіста працює неперервно. Вмикається привід робочого органу (не показано) та відбувається плавне затягування і нагнітання в'язкого тіста до матриць з наступним видавлюванням через отвори насадок матриць у вигляді джгутів. Застосування валкового робочого органу у вузлі подачі формувальної машини за корисною моделлю, що пропонується, призводить до наступного. Внаслідок того, що робочий валок виконаний так як показано на рис. 7.10, на початковій стадії відбувається більш плавне та ефективно затягування шару в'язкого тіста з підвищенням ефективності при нагнітанні. Таке підвищення ефективності роботи обумовлено тим, що при обертанні валка на початковій стадії відбувається рівномірне затягування маси без додаткового перемішування і надлишкових деформацій. В той же час при нагнітанні затягнутого в'язкого тіста до центральної частини робочого валка при заданому ступеню стискання, сприяє невеликим питомим витратами на подолання лобового опору при достатній ефективності видавлювання через отвори насадок.

Таким чином, наведений валковий робочий орган дозволяє організувати високоякісне транспортування і нагнітання тіста по всьому об'ємі вузла подачі без його структурної зміни при простоті обслуговування з мінімальними затратами енергії на процес формування заготовок тіста.

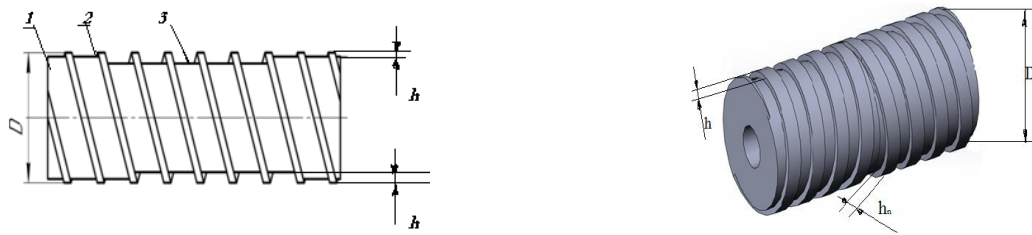


Рис. 6.10. Робочий орган вузла подачі тіста формувальної машини

Основним недоліком такого робочого органу подачі маси тіста є великий лобовий опір та зміна структури тіста, що створює перевитрати електроенергії та конструктивну складність при експлуатації. У результаті продуктивність усієї технологічної лінії знижується.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення ефективності затягування шару в'язкого тіста та підвищення ефективності на стадії його нагнітання за рахунок вдосконалення конструкції робочого органу формувальної машини, шляхом того, що у робочому органі формувальної машини вузла подачі тіста поперечний переріз являє собою фігуру правильного восьмикутника з додержанням геометричних параметрів r радіуса вписаного кола та радіуса R описаного кола при стороні kt , причому ця особливість описується залежністю:

$$R = t \sqrt{\frac{k}{k-1}} = \frac{2r}{k} \sqrt{\frac{k}{k-1}}$$

де r – радіус вписаного кола, мм; t – сторона шестикутника, мм;
 R – радіус описаного кола, мм;
 k – константа, рівна 2.4142.

На графічному зображенні представлено поперечний переріз валка (рис. 6.11).

Робочий орган формувальної машини являє собою валок. Поперечний переріз валка являє собою фігуру, виконану у формі восьмикутника. Рівність його сторін kt утворює кут 135° . Радіус R описаного кола 2 і r радіуса вписаного кола 3 дозволяє бути правильним, оскільки утворені вісім кутів між з'єднаними гранями рівні і становлять в сумі 360° .

Робочий орган формувальної машини працює наступним чином. У вузлі подачі маси тіста встановлено паралельно валкові робочі органи. Вмикається привід робочих валків та відбувається плавне затягування і нагнітання між ними

в'язкого тіста до матриць з наступним видавлюванням через отвори насадок матриць у вигляді джгутів. Застосування валкового робочого органу у вузлі подачі формувальної машини за корисною моделлю, що пропонується, призводить до наступного. Внаслідок того, що поперечний переріз робочого валка 1 виконаного так як показано на графічному зображенні, на початковій стадії відбувається більш плавне та ефективно зтягування шару в'язкого тіста з підвищенням ефективності при нагнітанні. Таке підвищення ефективності роботи обумовлено тим, що при обертанні валка відбувається плавне зтягування маси без додаткового перемішування і надлишкових деформацій. В той же час при нагнітанні зтягнутого в'язкого тіста робочим валком, що пропонується, обумовлює невеликі питомі витрати на подолання лобового опору при достатній ефективності видавлювання через отвори насадок.

Таким чином, наведений валковий робочий орган дозволяє організувати високоякісне транспортування і нагнітання тіста по всьому об'ємі вузла подачі без його структурної зміни при простоті обслуговування з мінімальними затратами енергії на процес формування заготовок тіста.

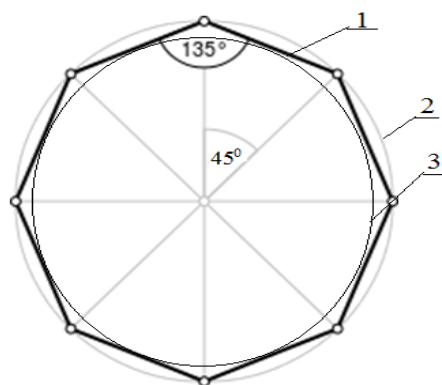


Рис. 6.11. Робочий орган вузла подачі тіста формувальної машини

6.3. Конструкції нових вузлів нагнітання з валковими робочими органами

Враховуючи розроблені конструкції валків, які частково розглянуті в попередньому параграфі, пропонується опис нових валкових робочих органів різної форми у вузлі нагнітання.

Основним недоліком вузла подачі тіста є великий лобовий опір та часткова зміна структури тіста, що створює перевитрати електроенергії. У результаті продуктивність усієї технологічної лінії знижується.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення ефективності вузла подачі тіста формувальної машини за рахунок вдосконалення конструкції, що містить бункер для завантаження тіста, нагнітальну камеру виконану з двох циліндричних рифлених валків, встановлених паралельно з можливістю проходження тіста між ними, шляхом того, що валки вузла подачі тіста виконані конічної форми із прямими рифлями по довжині, проте геометричні параметри конічної довжини валка L залежать від його більшого діаметру d і обраної оптимальної величини кута φ між горизонталлю та положенням твірної конуса, причому довжина виражається рівнянням:

$$L = \frac{d \operatorname{tg} \varphi}{2}$$

де d – більший діаметр валка, мм;

φ – кут між горизонталлю та положенням твірної конуса, градус.

На рис. 6.12(а) показаний загальний вигляд вузла подачі формувальної машини, на рис. 6.12(б) – загальний вигляд валка.

Вузол подачі тіста формувальної машини складається з бункера 1 для завантаження тіста 2. Нагнітальна камера 3 виконана з двох валків 4. Вони встановлені паралельно з можливістю проходження тіста між ними. Валки виконані конічної форми із прямими рифлями по його довжині. Довжина конічного валка залежить від кута φ , що є між горизонталлю (діаметром d) та положенням твірної конуса.

Сприятливий кут, який визначає оптимальну довжину валка, дорівнює 750, тоді довжина валка буде визначатися виразом:

$$L = 1.866d$$

Вузол подачі маси тіста працює дискретно. Тісто 2 завантажується в бункер 1 з якого самовільно поступає у нагнітальну камеру 3. У нагнітальній камері 3 встановлено паралельно валки 4. Вмикається привід валків (не показано) та відбувається плавне затягування і нагнітання між ними в'язкого тіста до формувального пристрою. Застосування валків у вузлі подачі формувальної машини за корисною моделлю, що пропонується, призводить до наступного. Внаслідок того, що валки 4 виконані так як показано на рис. 6.12, на початку дискретної стадії відбувається більш плавне та ефективне затягування

шару в'язкого тіста з підвищенням ефективності при нагнітанні. Таке підвищення ефективності роботи обумовлено тим, що при обертанні валків відбувається рівномірне зтягування маси без додаткового перемішування і деформації. В той же час при нагнітанні зтягнутого в'язкого тіста між валками, що пропонуються, обумовлює невеликі питомі витрати на подолання лобового опору при достатній ефективності видавлювання до формувального пристрою.

Таким чином, наведені валки дозволяють організувати високоякісне транспортування і нагнітання тіста по всьому об'ємі вузла подачі без його структурної зміни з мінімальними затратами енергії до формувального пристрою.

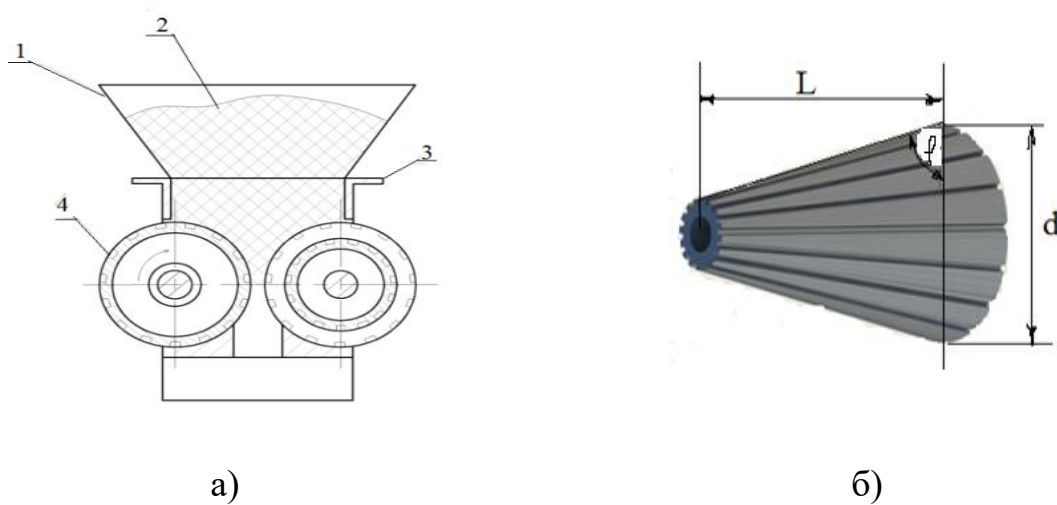


Рис. 6.12. Вузол подачі тіста формувальної машини

Основним недоліком вузла подачі тіста є великий лобовий опір та часткова зміна структури тіста, що створює перевитрати електроенергії. У результаті продуктивність усієї технологічної лінії знижується.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення ефективності вузла подачі тіста формувальної машини за рахунок вдосконалення конструкції, що містить бункер для завантаження тіста, нагнітальну камеру виконану з двох циліндричних рифлених валків, встановлених паралельно з можливістю проходження тіста між ними, шляхом того, що валки вузла подачі тіста виконані конічної форми із рифлями змінними по довжині кроком гвинтових ліній, проте рифлі з відповідною довжиною l і кутом захвату α із середнім радіусом конічного валка r при висоті b шару тіста зтягують масу тіста із найменшою товщиною його нагнітання h , причому довжина виражаються емпіричним рівнянням:

$$l = \kappa_l \left[(1 - \operatorname{tg} \alpha) \frac{\pi r^2}{b} - h \right]$$

де κ_l – коефіцієнт, що враховує властивості тіста;

α – кут захвату тіста рифлями по довжині гвинтових ліній валка, рад;

$r=0,625d$ – середній радіус конічного валка, мм;

b – висота зтягування шару тіста, що знаходиться в камері, мм;

h – товщина захвату маси тіста при його нагнітанні валками, мм.

На рис. 6.13 (а) показаний загальний вигляд вузла подачі формувальної машини, на рис. 6.13 (б) – загальний вигляд валка, на рис. 6.13 (в) – вид А на рис. 6.13 (б).

Вузол подачі тіста формувальної машини складається з бункера 1 для завантаження тіста 2, нагнітальної камери 3 виконаної з двох рифлених валків 4, встановлених паралельно з можливістю проходження тіста між ними. Вони виконані конічної форми із змінним по довжині кроком гвинтових ліній. Довжина гвинтової лінії з відповідним кутом захвату з маси тіста на певній висоті шар відповідної товщини. Нагнітання тіста залежить від його фізичних властивостей і середнього радіуса конічного валка.

Вузол подачі маси тіста працює дискретно. Тісто 2 завантажується в бункер 1 з якого самовільно поступає у вузол подачі 3, в якому встановлено паралельно робочі органи 4. Вмикається привід робочих органів (не показано) та відбувається плавне зтягування і нагнітання між ними в'язкого тіста до формувального пристрою. Застосування валкових робочих органів у вузлі подачі формувальної машини за корисною моделлю, що пропонується, призводить до наступного. Внаслідок того, що робочі валки 4 виконані так як показано на рис. 6.13, на початку дискретної стадії відбувається більш плавне та ефективно зтягування шару в'язкого тіста з підвищенням ефективності при нагнітанні. Таке підвищення ефективності роботи обумовлено тим, що при обертанні валків відбувається рівномірне зтягування маси без додаткового перемішування і деформації. В той же час при нагнітанні зтягнутого в'язкого тіста між робочими валками, що пропонуються, обумовлює невеликі питомі витрати на подолання лобового опору при достатній ефективності видавлювання до формувального пристрою.

Таким чином, наведені валкові робочі органи дозволяють організувати високоякісне транспортування і нагнітання тіста по всьому об'ємі вузла подачі

без його структурної зміни з мінімальними затратами енергії до формувального пристрою.

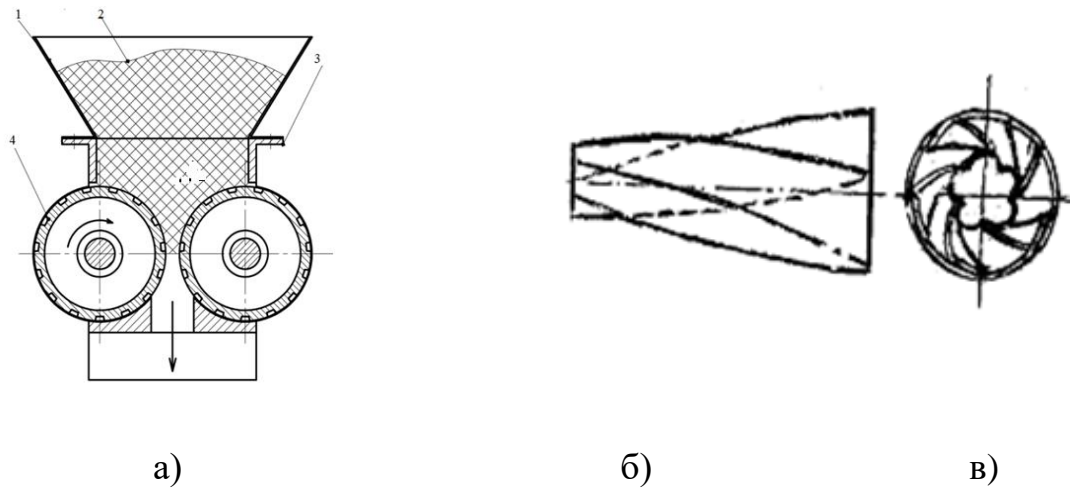


Рис. 6.13. Вузол подачі тіста формувальної машини

Основним недоліком вузла подачі тіста є великий лобовий опір та часткова зміна структури тіста, що створює перевитрати електроенергії. У результаті продуктивність усієї технологічної лінії знижується.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення ефективності вузла подачі тіста формувальної машини за рахунок вдосконалення конструкції, що містить бункер для завантаження тіста, нагнітальну камеру виконану з двох циліндричних рифлених валків, встановлених паралельно з можливістю проходження тіста між ними, шляхом того, що валки вузла подачі тіста виконані бочкоподібної форми із рифлями змінними по довжині кроком гвинтових ліній, причому геометричні параметри оцінюються безрозмірним коефіцієнтом максимального приросту кроку по косинусоїдальному закону затягування і нагнітання маси тіста за формулою:

$$k_t = \sin\left(\frac{\pi k_{bn}}{2}\right)$$

де k_{bn} – безрозмірний часовий коефіцієнт, який характеризується співвідношенням тривалості нагнітання і тривалості затягування маси тіста в транспортній системі бочкоподібних валків.

На рис. 6.14 (а) показаний загальний вигляд вузла подачі формувальної машини, на рис. 6.14 (б) – загальний вигляд робочого органа, на рис. 6.14 (в) – переріз б по А-А..

Вузол подачі тіста формувальної машини складається з бункера 1 для завантаження тіста 2, нагнітальної камери 3 виконаної з двох рифлених валків 4, встановлених паралельно з можливістю проходження тіста між ними. Вони виконані бочкоподібної форми із змінним по довжині кроком гвинтових ліній. Довжина гвинтової лінії з відповідним кутом захвачує з маси тіста на певній висоті шар відповідної товщини. Нагнітання тіста залежить від фізичних властивостей. Затягування і нагнітання маси тіста відбувається по косинусоїдальному закону.

Вузол подачі маси тіста працює дискретно. Тісто 2 завантажується в бункер 1 з якого самовільно поступає у вузол подачі 3, в якому встановлено паралельно робочі органи 4. Вмикається привід робочих органів (не показано) та відбувається плавне затягування і нагнітання між ними в'язкого тіста до формувального пристрою. Застосування валкових робочих органів у вузлі подачі формувальної машини за корисною моделлю, що пропонується, призводить до наступного. Внаслідок того, що робочі валки 4 виконані так як показано на рис. 6.14. На початку дискретної стадії відбувається більш плавне та ефективне затягування шару в'язкого тіста з підвищенням ефективності при нагнітанні. Таке підвищення ефективності роботи обумовлено тим, що при обертанні валків відбувається рівномірне затягування маси без додаткового перемішування і деформації. В той же час при нагнітанні затягнутого в'язкого тіста між робочими валками, що пропонуються, обумовлює невеликі питомі витрати на подолання лобового опору при достатній ефективності видавлювання до формувального пристрою.

Таким чином, наведені валкові робочі органи дозволяють організувати високоякісне транспортування і нагнітання тіста по всьому об'ємі вузла подачі без його структурної зміни з мінімальними затратами енергії до формувального пристрою.

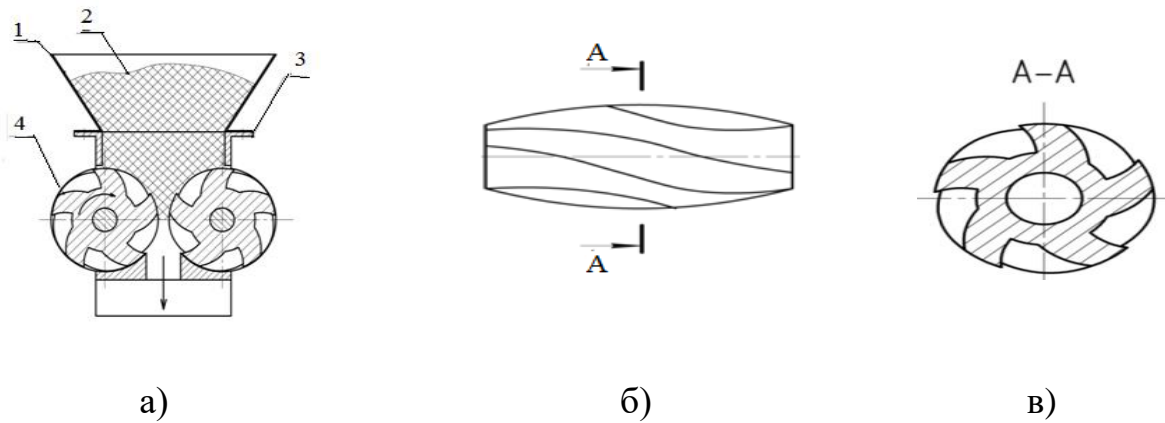


Рис. 6.14. Вузол подачі тіста формувальної машини

Основним недоліком вузла подачі тіста є великий лобовий опір та часткова зміна структури тіста, що створює перевитрати електроенергії. У результаті продуктивність усієї технологічної лінії знижується.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення ефективності вузла подачі тіста формувальної машини за рахунок вдосконалення конструкції, що містить бункер для завантаження тіста, нагнітальну камеру виконану з двох циліндричних рифлених валків, встановлених паралельно з можливістю проходження тіста між ними, шляхом того, що валки вузла подачі виконані у формі шнекової транспортної системи з постійним прискоренням а переміщення тіста при мінімально можливій довжині робочої поверхні S і мінімально можливій кількості витків із заданими початковим t_n і кінцевим t_k кроках, в якій геометричні залежності визначаються формулами:

$$a = \frac{t_n + t_k}{2t_n}; S = \frac{(t_n + t_k)^2}{4t_n}.$$

де t_n – початковий крок витка, мм;

t_k – кінцевий крок витка, мм.

На рис. 6.15 (а) показаний загальний вигляд вузла подачі формувальної машини, на рис. 6.15 (б) – загальний вигляд технологічної схеми шнекової транспортної системи робочого органа.

Вузол подачі тіста формувальної машини складається з бункера 1 для завантаження тіста 2, нагнітальної камери 3 виконаної з двох рифлених валків 4, встановлених паралельно з можливістю проходження тіста між ними. Вони виконані у формі шнеків із змінним по довжині коком витків.

Вузол подачі маси тіста працює дискретно. Тісто 2 завантажується в бункер 1 з якого самовільно поступає у вузол подачі 3, в якому встановлено паралельно робочі органи 4. Вмикається привід робочих органів (не показано) та відбувається плавне затягування і нагнітання між ними в'язкого тіста до формувального пристрою. Застосування валкових робочих органів у вузлі подачі формувальної машини за корисною моделлю, що пропонується, призводить до наступного. Внаслідок того, що робочі валки 4 виконані так як показано на рис.7.15а, на початку дискретної стадії відбувається більш плавне та ефективно затягування шару в'язкого тіста з підвищенням ефективності при нагнітанні. Таке підвищення ефективності роботи обумовлено тим, що при обертанні валків відбувається рівномірне затягування маси без додаткового перемішування і деформації. В той же час при нагнітанні затягнутого в'язкого тіста між робочими валками, що пропонуються, обумовлює невеликі питомі витрати на подолання лобового опору при достатній ефективності видавлювання до формувального пристрою.

Таким чином, наведені валкові робочі органи дозволяють організувати високоякісне транспортування і нагнітання тіста по всьому об'ємі вузла подачі без його структурної зміни з мінімальними затратами енергії до формувального пристрою.

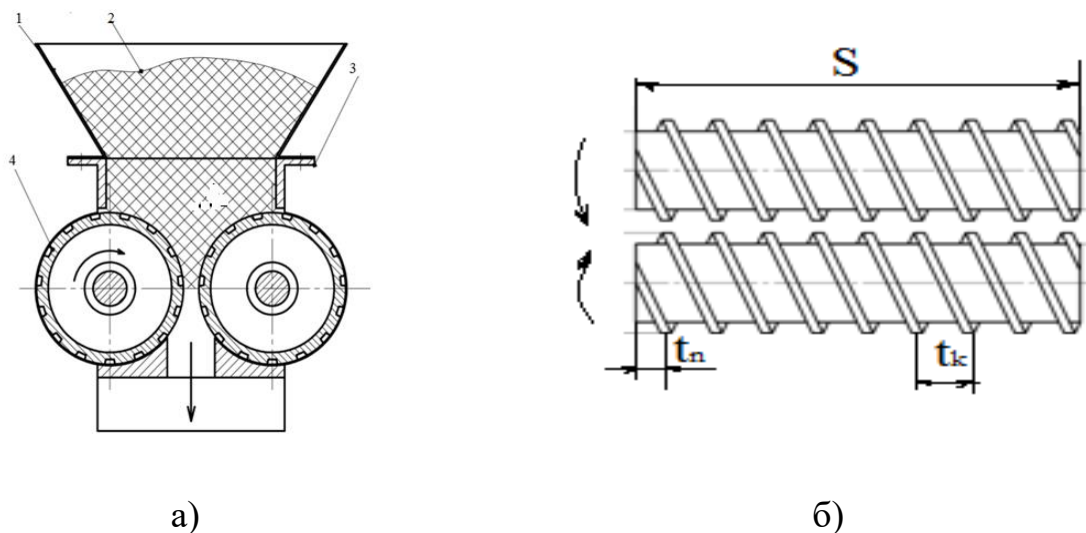


Рис. 6.15. Вузол подачі тіста формувальної машини

Основним недоліком нагнітального механізму є великий лобовий опір та зміна структури тіста, що створює перевитрати електроенергії та конструктивну

складність при експлуатації. У результаті продуктивність усієї технологічної лінії знижується.

В основу винаходу поставлено задачу удосконалення нагнітального механізму формувальної машини на стадіях затягування та нагнітання маси тіста, та зміна і, за рахунок цього, забезпечення ефективності роботи з меншими витратами електроенергії на виробництво продукції.

Поставлена задача в нагнітальному механізмі формувальної машини вирішується шляхом того, що у валках вузла подачі тіста, встановлених паралельно з можливістю проходження тіста між ними до матриць, з наступним його видавлюванням через отвори насадок матриць у вигляді джгутів, їх поперечний переріз являє собою фігуру, виконану у формі трикутного рівновісного контуру, який описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} x = (0.5D \pm e \cos(3\varphi)) \cos \varphi - 3e \sin(3\varphi) \sin \varphi \\ y = (0.5D \pm e \cos(3\varphi)) \sin \varphi - 3e \sin(3\varphi) \cos \varphi \end{cases}$$

де D – середній діаметр поперечного перерізу валка;

φ – кутовий параметр рівновісного контуру;

e – константа;

x, y – координати трикутного рівновісного контуру відповідно по осях x, y Декартової системи координат.

На рис.6.17(а) – загальний вигляд нагнітального механізму, рис. 6.17(б) – січення валка для розрахунку форми.

Нагнітальний механізм машини для формування тістових заготовок містить послідовно з'єднані бункер 1 для завантаження тіста 2 і вузол подачі тіста 3. Він закріплений на верхній площині 4 станини машини рис. 6.17. Вузол виконаний з двох циліндричних валків 5. Вони встановлені паралельно з можливістю проходження тіста між ними до матриць 6. Отвори насадок матриць 7 видавлюють тісто у вигляді джгутів. Поперечний переріз циліндричного валка являє собою фігуру, виконану у формі трикутного рівновісного контуру.

Початок Декартової системи координат розміщений у центрі (точка O) трикутного рівновісного контуру (рис. 6.17(б)).

Нагнітальний механізм формувальної машини працює наступним чином. Тісто 2 завантажується в бункер 1 з якого самовільно поступає в вузол подачі 3. У вузлі подачі маси тіста встановлено паралельно валкові робочі органи 5. Вмикається привід робочих валків та відбувається плавне затягування і

нагнітання між ними в'язкого тіста до матриць 6 з наступним видавлюванням через отвори насадок 7 матриць у вигляді джгутів. Застосування валкових робочих органів у вузлі подачі формувальної машини, що пропонується, призводить до наступного. Внаслідок того, що поперечний переріз робочих валків виконаний так як показано на рис. 6.17, на початковій стадії відбувається більш плавне та ефективно зтягування шару в'язкого тіста з підвищенням ефективності при нагнітанні. Таке підвищення ефективності роботи обумовлено тим, що при обертанні валків відбувається порційне зтягування маси без додаткового перемішування і надлишкових деформацій. В той же час при нагнітанні зтягнутого в'язкого тіста робочими валками вузла подачі, що пропонується, обумовлює невеликі питомі витрати на подолання лобового опору при достатній ефективності видавлювання через отвори насадок.

Таким чином, наведений механізм подачі маси тіста у формувальній машині дозволяє організувати високоякісне транспортування і нагнітання тіста по всьому об'ємі вузла подачі без його структурної зміни при простоті обслуговування з мінімальними затратами енергії на процес формування заготовок тіста.

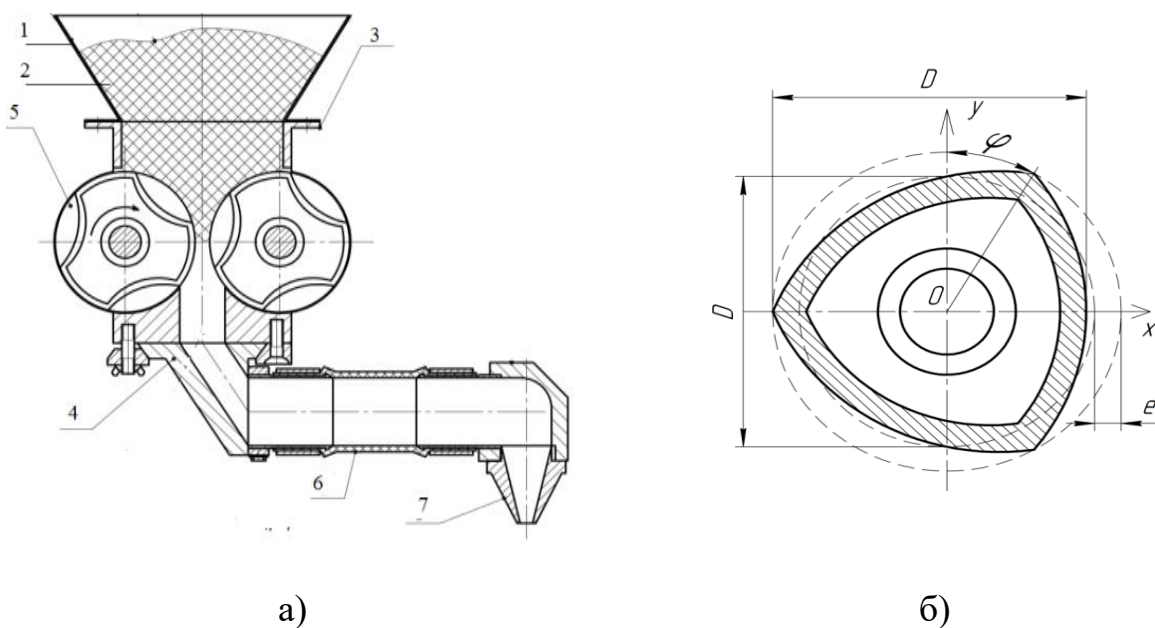


Рис. 6.17. Нагнітальний механізм для формувальної машини

Суттєвим недоліком валка нагнітання є наявність адгезії тіста до його поверхонь, зміна структури тіста, що вносить елемент нестабільності в роботі подальшого технологічного процесу. У результаті продуктивність усієї технологічної лінії знижується.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення ефективності вузла подачі тіста формувальної машини за рахунок вдосконалення конструкції, що містить бункер для завантаження тіста, нагнітальну камеру виконану з двох рифлених циліндрично-гвинтових валків із постійним по довжині кроком гвинтових ліній, встановлених паралельно з можливістю проходження тіста між ними, шляхом того, що мінімальна висота h рифлів циліндрично-гвинтових валків залежить від їх ширини δ і кута нахилу φ , причому ця особливість описується залежністю:

$$h = \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{4} \left(1 + \frac{\pi}{4}\right) \sin \varphi}}$$

де h – висота рифлі, мм;

δ – ширина циліндрично-гвинтової рифлі з постійним по довжині кроком лінії, мм;

φ – кут нахилу рифлі гвинтової лінії.

На рис.6.18(а) показаний загальний вигляд вузла подачі формувальної машини, на рис. 6.18(б) – загальний вигляд циліндрично-гвинтового валка з рифлями.

Вузол подачі тіста формувальної машини складається з бункера 1 для завантаження тіста 2, нагнітальної камери 3 виконаної з двох валків 4. Валки 4 встановлені паралельно з можливістю проходження тіста між ними. Вони виконані у формі циліндрично-гвинтових рифлів. Валкові циліндрично-гвинтові рифлі можуть бути виконані з мінімальною висотою h , коли їх ширини δ незначна і кута φ нахилу становить 600. На кут φ нахилу впливає постійне значення величини з квадратного кореня.

Вузол подачі маси тіста працює дискретно. Тісто 2 завантажується в бункер 1 з якого самовільно поступає у вузол подачі 3. У вузлі 3 встановлено паралельно робочі органи 4. Вмикається привід робочих органів (не показано) та відбувається плавне затягування і нагнітання між ними в'язкого тіста до формувального пристрою. Для сприятливих значень висоти рихлів їх кут нахилу h має перебувати в межах 15...300 при ширині δ в межах 8...11 мм. Застосування валкових робочих органів у вузлі подачі формувальної машини за корисною моделлю, що пропонується, призводить до наступного. Внаслідок того, що робочі валки 4 виконані так як показано на рис. 7.18, на початку

дискретної стадії відбувається більш плавне та ефективне затягування шару в'язкого тіста з підвищенням ефективності при нагнітанні. Таке підвищення ефективності роботи обумовлено тим, що при обертанні валків 4 з мінімальною висотою h при додержанні ширини δ і кута φ нахилу відбувається рівномірне затягування маси без додаткового перемішування і деформації. В той же час при нагнітанні затягнутого в'язкого тіста 2 між робочими валками 4, що пропонуються, обумовлює невеликі питомі витрати при достатній ефективності видавлювання до формувального пристрою.

Таким чином, наведені валкові робочі органи дозволяють організувати високоякісне транспортування і нагнітання тіста по всьому об'ємі вузла подачі без його структурної зміни з мінімальними затратами енергії до формувального пристрою.

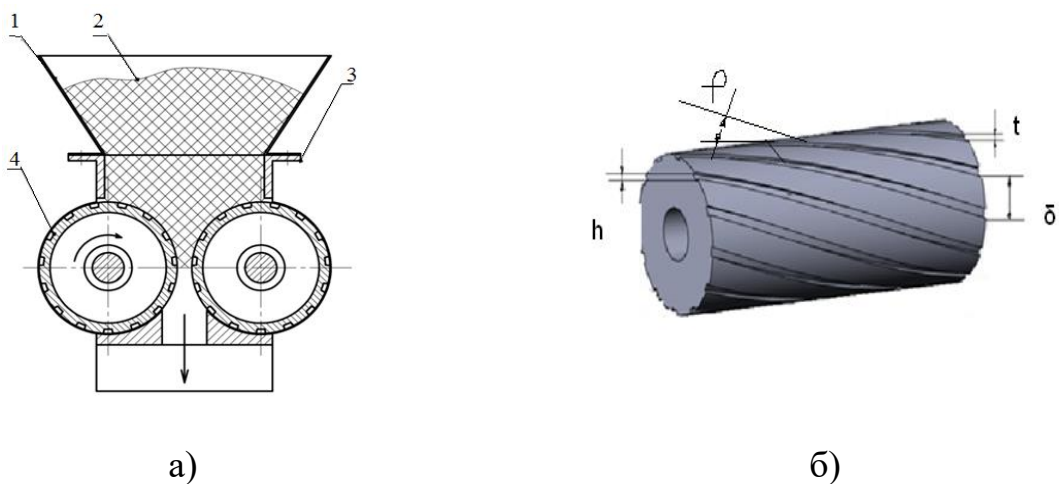


Рис. 6.18. Вузол подачі тіста формувальної машини

Суттєвим недоліком валка нагнітання є наявність адгезії тіста до його поверхонь, зміна структури тіста, що вносить елемент нестабільності в роботі подальшого технологічного процесу. У результаті продуктивність усієї технологічної лінії знижується.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення ефективності вузла подачі тіста формувальної машини за рахунок вдосконалення конструкції, що містить бункер для завантаження тіста, нагнітальну камеру виконану з двох циліндрично-гвинтових валків із постійним по довжині кроком гвинтових ліній, встановлених паралельно з можливістю проходження тіста між ними, шляхом того, що мінімальна ширина δ циліндрично-гвинтових рифлів залежить від їх кількості z , висоти h і кроку t , причому ця особливість описується залежністю:

$$\delta = \sqrt{h\left(\frac{t}{\sin \frac{180}{z}} - h\right)}$$

де h – висота рифлів, мм;

z – число рифлів;

t – крок циліндрично-гвинтових рифлів із постійною по довжині кроком гвинтових ліній, мм.

На рис.7.19(а) показаний загальний вигляд вузла подачі формувальної машини, на рис. 7.19(б) – загальний вигляд циліндрично-гвинтового валка.

Вузол подачі тіста формувальної машини складається з бункера 1 для завантаження тіста 2, нагнітальної камери 3 виконаної з двох циліндрично-гвинтових валків 4. Валки 4 встановлені паралельно з можливістю проходження тіста між ними і виконані у формі циліндрично-гвинтових рифлів із постійною по довжині кроком гвинтових ліній. Мінімальна ширина циліндрично-гвинтових рифлів δ залежить від висоти h . Відношення кроку t до значення \sin встановлює діаметр ділильного коло рифлів. Залежність висоти h рифлів, їх кількості z і кроку t , що визначають мінімальну ширину δ .

Вузол подачі маси тіста працює дискретно. Тісто 2 завантажується в бункер 1 з якого самовільно поступає у вузол подачі 3. У вузлі 3 встановлено паралельно робочі органи 4. Вмикається привід робочих органів (не показано) та відбувається плавне затягування і нагнітання між ними в'язкого тіста до формувального пристрою. Застосування валкових робочих органів у вузлі подачі формувальної машини за корисною моделлю, що пропонується, призводить до наступного. Внаслідок того, що робочі валки 4 виконані так як показано на рис. 7.19 (а), на початку дискретної стадії відбувається більш плавне та ефективне затягування шару в'язкого тіста з підвищенням ефективності при нагнітанні. Таке підвищення ефективності роботи обумовлено тим, що при обертанні валків 4 з мінімальною їх шириною δ , висотою h , кроком t відбувається рівномірне затягування маси без додаткового перемішування і деформації. В той же час при нагнітанні затягнутого в'язкого тіста 2 між робочими валками 4, що пропонуються, обумовлює невеликі питомі витрати при достатній ефективності видавлювання до формувального пристрою.

Таким чином, наведені валкові робочі органи дозволяють організувати високоякісне транспортування і нагнітання тіста по всьому об'ємі вузла подачі

без його структурної зміни з мінімальними затратами енергії до формувального пристрою.

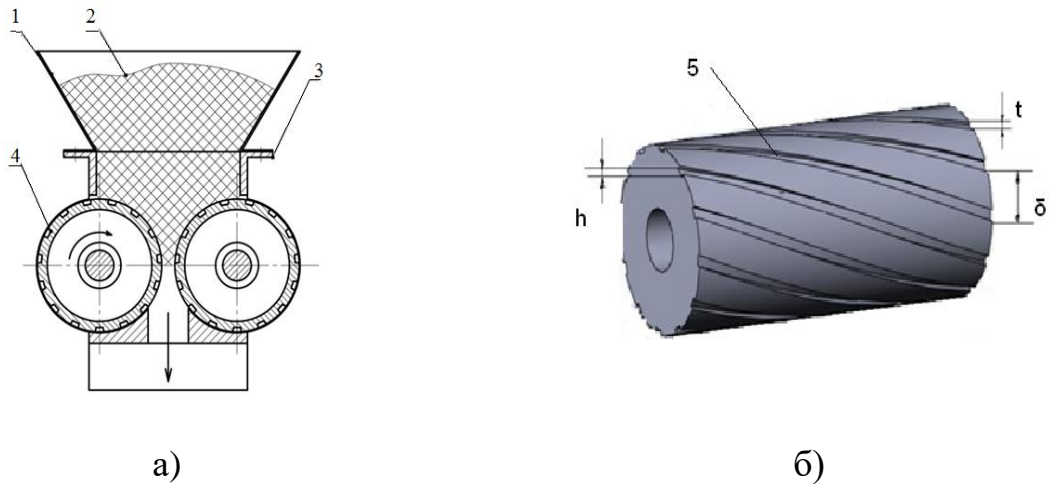


Рис. 6.19. Вузол подачі тіста формувальної машини

Суттєвим недоліком вузла натирання тіста є наявність декількох проміжних операцій по розкачуванню тістових заготовок, кожна з яких, зважаючи на деформацію заготовок тіста під власною масою та їх адгезією до поверхонь валків, вносить елемент нестабільності в роботі подальшого технологічного процесу.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення ефективності вузла натиральної машини за рахунок вдосконалення конструкції, що складається із станини, стрічкового транспортера, пари прокатних валків розміщених один під одним, шляхом того, що прокатні валки виконані однакового діаметру із насічками, в яких геометричні параметри оцінюються максимально розвинутою площею з поєднанням транспортних та технологічних функцій, що описуються площею робочої поверхні за формулою:

$$F_p = 0,785 \cdot (D^2 - d^2) \frac{2}{t_p}$$

де D – діаметр прокатного валка по зовнішній поверхні насічок, мм;

d – діаметр прокатного валка по основі насічок, мм;

t – крок насічок, мм.

На рис. 6.20 (а) – показаний загальний вигляд прокатних валків натиральної машини; рис. 6.20 (б) – загальний вигляд робочого валка з насічками; рис. 7.20 (в) – переріз по А–А рис. 6.20 (б).

Вузол натиральної машини складається із станини 1 на якій розміщено стрічковий транспортер 2. Він розміщений так, щоб маса тіста мала змогу транспортуватися до пари валків 3 і 4. Пара прокатних валків 3 і 4 розміщені горизонтально і паралельно між собою. Верхній 3 і нижній 4 валки виконані з однаковим діаметром. На своїх поверхнях вони мають нанесені насічки 5.

Вузол натиральної машини працює дискретно. Тісто завантажується на стрічковий транспортер 2 і декілька разів пропускається вперед і назад між валками 3 і 4. Після кожного проходу пласт тіста складається удвоє і зменшується міжвалковий зазор. Зворотно-поступальний рух транспортера 2 та зміна напрямку обертання валків здійснюється реверсивним пускачем, який переключає двигун на прямий та зворотний хід (не показано). Застосування валкових робочих органів у вузлі натиральної машини за корисною моделлю, що пропонується, призводить до наступного. Внаслідок того, що робочі валки 3 і 4 виконані так як показано на рис. 6.20 (б, в), на початку дискретної стадії відбувається більш плавне та ефективно зтягування шару в'язкого тіста з підвищенням ефективності транспортних, деформаційних та технологічних функцій. Таке підвищення ефективності роботи обумовлено тим, що при обертанні валків відбувається рівномірне зтягування більшої маси тіста без додаткового ковзання його по поверхні нижнього валка. В той же час при розкачуванні зтягнутого в'язкого тіста між прокатними валками, що пропонуються, обумовлює якісне його ущільнення з дрібношпаруватою структурою при достатній ефективності технологічних функцій.

Таким чином, наведені прокатні валки дозволяють організувати високоякісне транспортування і розкачування тіста по всьому міжвалковому зазору з якісними структурними змінами та мінімальними затратами на виконання процесу.

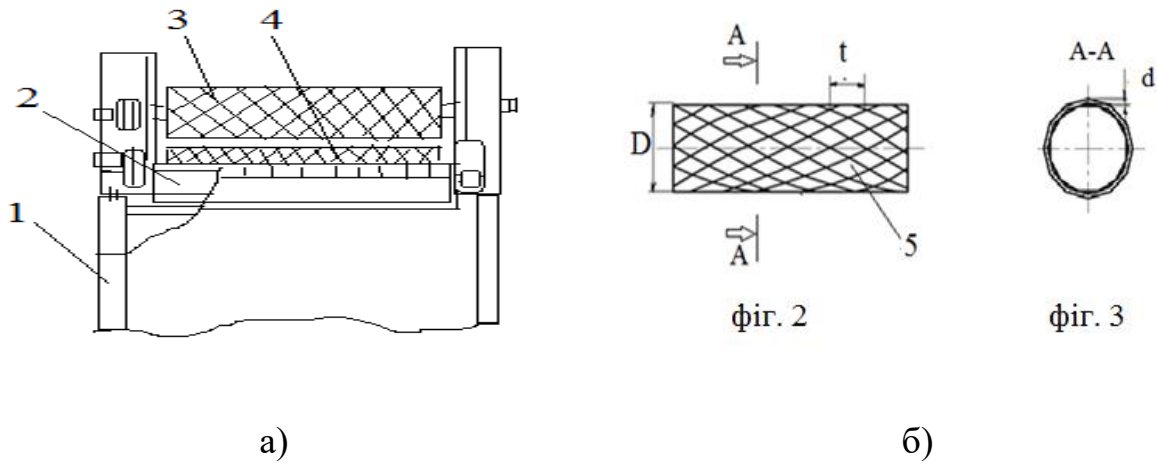


Рис. 6.20. Вузол натиральної машини

Основним недоліком вузла подачі тіста є великий лобовий опір та часткова зміна структури тіста, що створює перевитрати електроенергії. У результаті продуктивність усієї технологічної лінії знижується.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення ефективності вузла подачі тіста формувальної машини за рахунок вдосконалення конструкції, що містить бункер для завантаження тіста, нагнітальну камеру виконану з двох циліндричних рифлених валків, встановлених паралельно з можливістю проходження тіста між ними, шляхом того, що валки вузла подачі тіста виконані конічної форми із рифлями змінними по довжині кроком гвинтових ліній, проте рифлі з відповідною довжиною l і кутом захвату α із середнім радіусом конічного валка r при висоті b шару тіста зтягують масу тіста із найменшою товщиною його нагнітання h , причому довжина виражаються емпіричним рівнянням:

$$l = k_1 \left[(1 - \operatorname{tg} \alpha) \frac{\pi r^2}{b} - h \right]$$

де k_1 – коефіцієнт, що враховує властивості тіста;

α – кут захвату тіста рифлями по довжині гвинтових ліній валка, рад;

$r=0,625d$ – середній радіус конічного валка, мм;

b – висота зтягування шару тіста, що знаходиться в камері, мм;

h – товщина захвату маси тіста при його нагнітанні валками, мм.

На рис. 6.21 (а) показаний загальний вигляд вузла подачі формувальної машини, на рис. 6.21 (б) – загальний вигляд валка, рис. 6.21 (в) – вид А на б.

Вузол подачі тіста формувальної машини складається з бункера 1 для завантаження тіста 2, нагнітальної камери 3 виконаної з двох рифлених валків 4, встановлених паралельно з можливістю проходження тіста між ними. Вони виконані конічної форми із змінним по довжині кроком гвинтових ліній. Довжина гвинтової лінії з відповідним кутом захвачує з маси тіста на певній висоті шар відповідної товщини. Нагнітання тіста залежить від його фізичних властивостей і середнього радіуса конічного валка.

Довжина зтягування тіста по гвинтовій лінії виражаються емпіричним рівнянням. Вузол подачі маси тіста працює дискретно. Тісто 2 завантажується в бункер 1 з якого самовільно поступає у вузол подачі 3, в якому встановлено паралельно робочі органи 4. Вмикається привід робочих органів (не показано) та відбувається плавне зтягування і нагнітання між ними в'язкого тіста до формувального пристрою. Застосування валкових робочих органів у вузлі подачі формувальної машини за корисною моделлю, що пропонується, призводить до наступного. Внаслідок того, що робочі валки 4 виконані так як показано на рис. 6.21, на початку дискретної стадії відбувається більш плавне та ефективно зтягування шару в'язкого тіста з підвищенням ефективності при нагнітанні. Таке підвищення ефективності роботи обумовлено тим, що при обертанні валків відбувається рівномірне зтягування маси без додаткового перемішування і деформації. В той же час при нагнітанні зтягнутого в'язкого тіста між робочими валками, що пропонуються, обумовлює невеликі питомі витрати на подолання лобового опору при достатній ефективності видавлювання до формувального пристрою.

Таким чином, наведені валкові робочі органи дозволяють організувати високоякісне транспортування і нагнітання тіста по всьому об'ємі вузла подачі без його структурної зміни з мінімальними затратами енергії до формувального пристрою.

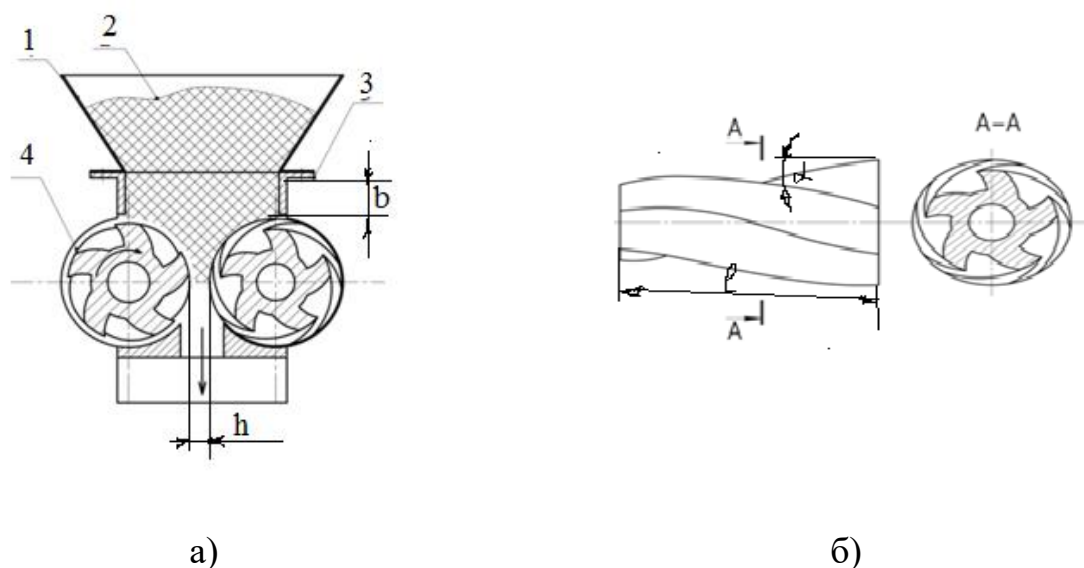


Рис. 6.21. Вузол подачі тіста формувальної машини

6.4. Економічна ефективність від впровадження результатів досліджень

Економічну ефективність від впровадження нової техніки оцінюють методом порівняння основних змінених параметрів з базовим зразком.

Очевидні наступні статті отримання економічного ефекту:

- використання нових конструкцій валкових машин;
- використання нових геометричних поверхонь валків;
- використання раціональних матеріалів для виготовлення поверхонь валків і способів їх виготовлення;
- використання сучасних технологій модифікації і деталей;
- формувальних машин.

При використанні валкових машин, що мають вдосконалену конструкцію, економічний ефект обумовлюється такими чинниками:

- збільшенням виходу готового продукту внаслідок зменшення адгезійних втрат (забезпечується негайним виведенням тіста із зони нагнітання і обмеженням тиску на нього в формувальному пристрої);
- збільшенням виходу сформованих тістових заготовок належної якості, що забезпечує підвищену кількість зв'язаної вологи в готових виробах (забезпечується отриманим ступенем стабільності нагнітання вдосконаленням конструкцій деталей валкового вузла);
- кращою якістю отриманого продукту завдяки однорідності його структури (досягається використанням раціональних конструкцій валків);

- спрощенням проектування конструкцій нових машин за вдосконаленими методиками розрахунку їх параметрів (забезпечується використанням нових комп'ютерних способів проектування);
- підвищеною продуктивністю валкового вузла (досягається конструктивною досконалістю деталей);
- зменшенням капіталовкладень на виготовлення валкового вузла машини (завдяки спрощенню конструкції);
- скороченням видатків на оплату праці оператора (завдяки автоматизації технологічного процесу);
- підвищенням довговічності валків (досягається використанням зносостійких матеріалів і захисних покриттів при виготовленні);
- зменшенням собівартості валкового вузла (забезпечується кращою технологічністю виготовлення).
- зменшенням капіталовкладень на оснащення технологічних ліній (завдяки суміщенню технологічних операцій і вилучення з ліній зайвого обладнання);
- скороченням обсягу задіяних виробничих площ (завдяки використанню розроблених нових конструкцій машин зі зменшеною матеріаломісткістю і габаритами);
- зменшенням експлуатаційних витрат на придбання допоміжного інструменту (завдяки можливості його зміцнення захисними покриттями і застосуванню раціонального способу виготовлення пазів);
- зменшенням експлуатаційних витрат переробного підприємства завдяки підвищенню довговічності машин;
- підвищенням конкурентоспроможності виготовленої продукції машинобудівних підприємств, що виготовляють формувальні валки для промисловості (завдяки значному підвищенню довговічності інструментів запропонованими способами);
- зменшенням капітальних і експлуатаційних витрат для машинобудівного підприємства на зміцнення валків (досягається завдяки підвищеній ефективності зміцнювальної обробки).

Річний економічний ефект від використання розробленої конструкції машин можна визначити за формулою:

$$\dot{A}_{\hat{\alpha}\hat{\delta}} = \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_3$$

де A_1 – економічний ефект, за рахунок зменшення собівартості продукції, капіталовкладень та підвищенням продуктивності обладнання, грн;

A_2 – економічний ефект, за рахунок зменшення експлуатаційних витрат, грн;

A_3 – економічний ефект, за рахунок підвищення прибутку завдяки підвищенню якості продукції, грн.

Ці компоненти інтегрального економічного ефекту визначаються за формулами:

$$\dot{A}_1 = [(\tilde{N}_1 + \hat{E}_{1i}) - (\tilde{N}_2 - \hat{e}_i \cdot \hat{E}_{2i})] \cdot \dot{A}_2,$$

$$\dot{A}_2 = [\dot{A}_{1i} - \dot{A}_{2i}] \cdot \dot{A}_2,$$

$$\dot{A}_3 = [\ddot{I}_{2i} - \ddot{I}_{1i}] \cdot \dot{A}_2,$$

де C_1 – собівартість одиниці продукції до впровадження нової техніки, грн/кг;

C_2 – собівартість продукції після впровадження нової техніки, грн/кг;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, ($E_n=0,15$);

$K_{1п}$ – питомі капітальні витрати до впровадження нової техніки, грн/кг;

$K_{2н}$ – питомі капітальні витрати після впровадження нової техніки, грн/кг;

A_2 – річний обсяг виготовленої продукції після впровадження нової техніки, т;

$E_{1п}$ – питомі експлуатаційні вкладення до впровадження нової техніки, грн/кг;

$E_{2н}$ – питомі експлуатаційні вкладення після впровадження нової техніки, грн/кг;

P_1 – прибуток від реалізації продукції при її виготовленні до впровадження нової техніки, грн/кг;

P_2 – прибуток від реалізації продукції при її виготовленні після впровадження нової техніки, грн/кг.

Питомі капітальні витрати до і після впровадження нової техніки визначаються так:

$$\hat{E}_{1i}(\hat{E}_{2i}) = \frac{\hat{E}_1(\hat{E}_2)}{\dot{A}_1(A_2)},$$

де K_1 – капітальні вкладення до впровадження нової техніки, грн;

K_2 – капітальні вкладення після впровадження нової техніки, грн;

A_1 – річний обсяг виробництва продукції до впровадження нової техніки, кг;

A_2 – річний обсяг виробництва продукції після впровадження нової техніки, кг.

Капітальні вкладення є сумою наступних витрат:

$$\hat{E} = C_{\hat{E}} + C_{\hat{A}} + C_{i\delta} + C_{i\dot{i}} + C_{i\ddot{e}} + C_{i\phi},$$

де $ЗК$ – витрати на конструювання обладнання, грн;

$ЗВ$ – витрати на виготовлення обладнання ($ЗВ=1,4\div 1,8\cdot ЗК$), грн;

$Зпр$ – витрати на придбання оснащення, грн;

$Змон$ – витрати на монтаж обладнання, грн;

$Зпл$ – витрати на забезпечення виробничими площами, грн;

$Зінш$ – інші витрати ($Зінш=1,01\cdot [ЗК\dots Зпл]$), грн.

Річний обсяг виробництва A_2 після впровадження нової техніки визначається за формулою:

$$A_2 = A_1 + \Delta A$$

де ΔA – річний приріст випускної продукції у натуральному вимірюванні.

$$\Delta A = (Q_2 - Q_1) \cdot \tilde{N}_{\dot{c}_i} \cdot F \cdot K_i$$

де Q_1, Q_2 – відповідно, продуктивність машини до і після впровадження новацій, т/год;

$С_{зм}$ – кількість змін роботи машини, $С_{зм}=1$;

F – кількість робочих днів у році ($F=250$);

K_p – коефіцієнт використання потужності ($K_p=0,85\div 0,95$).

Питомі експлуатаційні витрати до і після впровадження нової техніки визначаються за формулою:

$$\dot{A}_{Ii}(\dot{A}_{2i}) = \frac{\dot{A}_I(\dot{A}_2)}{\dot{A}_I(A_2)}$$

де E1 – експлуатаційні витрати до впровадження нової техніки, грн;
E2 – експлуатаційні витрати після впровадження нової техніки, грн.

Експлуатаційні витрати визначаються за формулою:

$$\dot{A} = C_{\dot{A}I} + C_{\dot{A}AD\tilde{N}} + C_{\dot{A}D^2C} + C_{\dot{A}II} ,$$

де ЗЕН – витрати на оплату електроенергії, що споживається обладнанням, грн.;
ЗПЕРС – витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу, грн;
ЗРІЗ – витрати на придбання інструменту, грн;
ЗОП – витрати на опалення та водопостачання приміщень, грн.

Прибуток від реалізації продукції при її виготовленні до впровадження нової техніки визначається наступним чином:

$$\dot{I}_I(\dot{I}_2) = \ddot{O}_I(\ddot{O}_2) - \tilde{N}_I(\tilde{N}_2) ,$$

де Ц1 – ціна продукції при її виготовленні до впровадження нової техніки, грн/кг;
Ц2 – ціна продукції при її виготовленні після впровадження нової техніки, грн/кг.

Таким чином, сумарний економічний ефект описується формулою:

$$\dot{A}_{\dot{a}\dot{o}} = [(\tilde{N}_I + \hat{E}_{Ii}) - (\tilde{N}_2 - \hat{e}_i \cdot \hat{E}_{2i})] + (\dot{A}_{Ii} - \dot{A}_{2i}) + (\dot{I}_{2i} - \dot{I}_{Ii}) \cdot \dot{A}_2$$

Термін окупності капітальних вкладень:

$$\dot{O}_{ie} = \frac{\hat{E}_2 - \hat{E}_1}{\tilde{N}_1 - \tilde{N}_2} \leq 3 \delta i e \dot{e} .$$

Висновки. В розділі розкрито основні принципи управління складними технологічними комплексами, що спрямовані на перспективні напрямки розвитку систем управління стабільності розкачування валками на основі інженерного підходу до конструктивних параметрів. Параметри ґрунтуються на основі створення більш досконалих поверхонь валків та принципів технологічного процесу нагнітання, розкачування, а також їх управління.

Запропоновано застосуванням керованих механізмів – частоти обертання валків, тривалості їх дії, температурних режимів, дискретно – імпульсного впливу.

Розробка принципів управління технологічними процесами стабільності розкачування, формування на основі конструктивних параметрів нових конструкцій валків сприяє підвищенню продуктивності, зменшенню питомих витрат і витрат ресурсів та сировини, поліпшенню якості продукції.

Принцип впливу нових валків ґрунтується на перспективних параметрах впливу з формуванням умов впливу при встановлених методах регулювання деформаційних процесів. Цей ефект базується величиною сили тертя між середовищем і поверхнею валків, яка мінімізована.

Приведено підхід до розробки методів розрахунку шнекових валкових робочих органів, оснований на використанні напівемпіричних законів, статистичних даних за видами валків і діючих на середовище сил у робочій зоні конкретного вузла.

Подано всі нові розробки щодо конструювання машин з валковими робочими органами.

Список використаної літератури

1. Деркач А. П., Стадник І. Я., Василів В. П. застосування експериментально-статистичного моделювання для дослідження параметрів надійності валкових машин. Научний вигляд в будуще. ISSUE№2, 2016. С. 63–66.
2. Сухенко В. Ю., Дзюб А, Мануилов В. Методика исследования процессов коррозионно-механического изнашивания оборудования пищевых и перерабатывающих производств. polish Academy of Sciences/-Lublin-Rzeszow; AgroMedia 2014. Vol. 16. № 3. С. 74–81.
3. Виноградов И. Э. Физические методы исследования противозадирных присадок к маслам. Методы оценки противозадирных и противозадирных противоизносных свойств смазочных материалов. М. : Наука, 1969, С. 21–24.

4. Крагельский И. В. Некоторые задачи науки о трении. В об. «Проблемы тения и изнашивания». К. «Техныка», 1981. Вып. 1. С. 11–17.
5. Ребиндер П. А., Епифанов И. Влияние поверхностно-активной среды на граничное течение и знос в кн. Развитие теории трения и изнашивания. М. : АН СССР, 1957. С.47–56.
6. Стадник І., Деркач А. Обґрунтування побудови досконалості машин із валковими робочими органами. Хранение и переработка зерна. 2016 № 2 (199). С. 47–50.
7. Стадник І., Деркач А., Василів В. Визначення потужності валкової тісторозкаточної машини. Знання. 2016. № 3–2. С. 36–41.
8. Drozdziel P., Derkach A., Stadnyk I., Vitenko T. 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.
9. 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.
10. Гаврилко 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.
11. Вузол подачі тіста формувальної машини. Деклараційний патент на корисну модель № 111060. Україна, 25.10.2016 р.
12. Вузол подачі тіста формувальної машини. Деклараційний патент на корисну модель № 111057. Україна, 25.10.2016 р.
13. Вузол подачі тіста формувальної машини. Деклараційний патент на корисну модель № 111057. Україна, 25.10.2016 р.
14. Вузол подачі тіста формувальної машини. Деклараційний патент на корисну модель № 111058. Україна, 25.10.2016 р.
15. Вузол подачі тіста формувальної машини. Деклараційний патент на корисну модель № 111503. Україна, 10.11.2016 р.
16. Вузол подачі тіста формувальної машини. Деклараційний патент на корисну модель № 112354. Україна, 12.12.2016 р.
17. Робочий орган вузла подачі тіста формувальної машини. Деклараційний патент на корисну модель № 112744. Україна, 26.12.2016 р.
18. Робочий орган вузла подачі тіста формувальної машини. Деклараційний патент на корисну модель № 112746. Україна, 26.12.2016 р.
19. Робочий орган вузла подачі тіста формувальної машини. Деклараційний патент на корисну модель № 113255. Україна, 25.01.2017 р.

20. Робочий орган вузла подачі тіста формувальної машини. Деклараційний патент на корисну модель № 113256. Україна, 25.01.2017 р.
21. Робочий орган вузла подачі тіста формувальної машини. Деклараційний патент на корисну модель № 113337. Україна, 25.01.2017 р.
22. Робочий орган вузла подачі тіста формувальної машини. Деклараційний патент на корисну модель № 113337. Україна, 25.01.2017 р.
23. Робочий орган вузла подачі тіста формувальної машини. Деклараційний патент на корисну модель № 113270. Україна, 25.01.2017 р.
24. Вузол подачі тіста формувальної машини. Деклараційний патент на корисну модель № 113299. Україна, 25.01.2017 р.
25. Робочий орган вузла подачі тіста формувальної машини. Деклараційний патент на корисну модель № 114346. Україна, 10.03.2017 р.
26. Вузол нптиральної машини Деклараційний патент на корисну модель № 114674. Україна, 10.03.2017 р.
27. Застосування спрацьованих пасів передач тертям з гнучким зв'язком як початкових штучних заготовок для виготовлення шнекових заготовок Деклараційний патент на корисну модель № 116633. Україна, 25.05.2017 р.
28. Спосіб виготовлення овальних гвинтових заготовок Деклараційний патент на корисну модель № 117254. Україна, 26.06.2017 р.
29. Вузол подачі тіста формувальної машини Деклараційний патент на корисну модель № 201704950. Україна, 10.08.2017 р.
30. Вузол подачі тіста формувальної машини. Деклараційний патент на корисну модель № 119821. Україна, 10.10.2017 р.
31. Робочий орган формувальної машини. Деклараційний патент на корисну модель № 119803. Україна, 10.10.2017 р.
32. Вузол подачі тіста формувальної машини Деклараційний патент на корисну модель № 120324. Україна, 25.10.2017 р.
33. Вузол подачі тіста формувальної машини. Деклараційний патент на корисну модель № 120323. Україна, 25.10.2017 р.
34. Вузол подачі тіста формувальної машини Деклараційний патент на корисну модель № 201704952. Україна, 11.08.2017 р.

ВИСНОВКИ

У другій частині монографії на основі деформаційного та термодинамічного аналізу робочого процесу дії валкових робочих органів на тісто у формувальній машині розкрито, обґрунтовано та створено комплекс пропозицій по виготовленню нових поверхонь валків та їх форм. Використовуючи власний узагальнений теоретичний і експериментальний досвід, 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. Подано методика визначення продуктивності машини, швидкість течії та величину деформації тіста, температурні перепади та їх шляхи уникнення.

Виходячи з виконаних теоретичних та експериментальних досліджень, поданих у частині другій монографії, можна зробити такі висновки:

На основі аналітичного аналізу робочого процесу встановлено загальний алгоритм структурно-механічних змін середовища. Результати встановили основні характеристиками машин з валковими робочими органами для забезпечення необхідної і стабільної форми і розмірів виробу. На основі цього продовжено розкриття фізичної суті процесу формування тіста при дії валків.

Розроблено моделі робочого процесу для вирішення поставлених задач в першій частині. Розкрито температурний оптимум для процесу нагнітання тіста. Запропоновано ведення контролю температури тіста при протіканні процесу нагнітання. Запропоновано енергетичний баланс процесу.

Розглянуто можливість виникнення коливальних процесів як по кінематичним, так і по динамічним параметрам щодо екстремумів тисків. По-перше, самі зміни тисків означають зміни гідродинамічного стану середовища, а, по-друге, важливе значення можуть мати і нижні значення тисків та можливості переходу рідинної фази у метастабільний стан.

Для встановлення загальних закономірностей і меж зміни параметрів впливів виконано попередні розрахунки у відносно широкому стохастичному наборі даних щодо законів зміни тисків $P_2=P_2(t)$, часу перебігу перехідних процесів та коефіцієнтів затухання. Крім вказаних параметрів тиску і часу перебігу процесів в якості регульованого параметру впливу на систему розглянуто газоутримувальну здатність u_1 , яка за інших рівних умов визначається інтенсивністю бродіння. Інші параметри системи вважаємо стабілізованими.

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.

Розроблена методика інженерного розрахунку основних параметрів процесу відповідно до фізико-механічних властивостей тіста. Розкрито залежності зв'язку геометричних параметрів валків з робочою камерою.

Побудовано реологічну модель деформації пружно-в'язко-пластичного тіста при стисканні на нових конструкціях валків.

Аналітичний огляд існуючих технологій дозволив розкрити вплив бактерій на стан поверхні технологічного обладнання. Проаналізовано існуючі підходи щодо удосконалення шорсткості поверхні обладнання та доведено доцільність використання миючих засобів. Такий підхід дозволить зменшити втрати маси напівфабрикату і стабілізувати технологічний процес.

Порівняльний аналіз зміни об'єму стверджує, що можна суттєво впливати на процес нагнітання і так скоротити його тривалість. Тому в нових конструкціях вузла нагнітання передбачено зменшення деформації на тісто. Дотримання рівня стискання тістової маси при нагнітанні поліпшило якість готових виробів, тобто питомий об'єм максимально збільшився на 22%, пористість – на 4%.

Визначено криву швидкості течії тіста, де відзначено два параметри, що описують структурно-механічні властивості. Так, починаючи з швидкості 1,3 рад/с і напруження зсуву 1,02 кПа, відбувається початок зміни параметрів. Починаючи з швидкості 1,7 і напруження зсуву 3,92, течія тіста одержує пряму лінію, яка описує переміщення тіста між валками на ділянці нагнітання. Отримані результати дають можливість проводити розрахунки для визначення швидкості руху тіста при стисканні.

Проаналізовано та встановлено оптимальну пружність тіста при дії валків. Відзначено, що вона істотно залежить від співвідношення заданих величин циклів n , що характеризує собою величину між валками. Дуже слабо залежить від температури навколишнього середовища в діапазоні температур t_0 від 20°C до 35°C. Визначено та обґрунтовано вплив конструктивних параметрів валків на надійність вузла нагнітання тіста при проектуванні.

Розробка принципів управління технологічними процесами стадійності розкачування, формування на основі конструктивних параметрів нових конструкцій валків сприяє підвищенню продуктивності, зменшенню питомих втрат і витрат ресурсів та сировини, поліпшенню якості продукції.

Принцип впливу нових валків ґрунтується на перспективних параметрах впливу з формуванням умов впливу при встановлених методах регулювання деформаційних процесів. Цей ефект базується величиною сили тертя між середовищем і поверхнею валків, яка мінімізована.

Приведено підхід до розробки методів розрахунку шнекових валкових робочих органів, оснований на використанні напівемпіричних законів, статистичних даних за видами валків і діючих на середовище сил у робочій зоні конкретного вузла.

Подано всі нові розробки щодо конструювання машин з валковими робочими органами.

ДОДАТКИ

Додаток А

Лістинг 1

$$\begin{aligned}
 m1 &:= \begin{pmatrix} 9.9 \\ 9.7 \\ 9.5 \end{pmatrix} & m2 &:= \begin{pmatrix} 7.9 \\ 7.8 \\ 7.5 \end{pmatrix} & G &:= \begin{pmatrix} 10 \\ 10 \\ 10.8 \end{pmatrix} & k &:= \begin{pmatrix} 1.57 \\ 1.6 \\ 1.76 \end{pmatrix} \\
 \rho &:= \begin{pmatrix} 1.12 \\ 1.115 \\ 1.1 \end{pmatrix} & b &:= \begin{pmatrix} 0.34 \\ 0.23 \\ 0.2 \end{pmatrix} & dm &:= m1 - m2 & dm &= \begin{pmatrix} 2 \\ 1.9 \\ 2 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$$a1 := 0 \quad a2 := 0 \quad a3 := 0 \quad a4 := 0 \quad a5 := 0$$

$$\text{Given} \quad b = a1 \cdot dm + a2 \cdot G + a3 \cdot k + a4 \cdot \rho + a5$$

$$\begin{pmatrix} a1 \\ a2 \\ a3 \\ a4 \\ a5 \end{pmatrix} := \text{Minerr}(a1, a2, a3, a4, a5) \quad \begin{pmatrix} a1 \\ a2 \\ a3 \\ a4 \\ a5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.104 \\ -0.177 \\ 0 \\ -0.087 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Лістинг 2

$$\begin{aligned}
 m1 &:= \begin{pmatrix} 9.8 \\ 9.5 \\ 9.4 \end{pmatrix} & m2 &:= \begin{pmatrix} 7.8 \\ 7.7 \\ 7.5 \end{pmatrix} & G &:= \begin{pmatrix} 20 \\ 23 \\ 27 \end{pmatrix} & k &:= \begin{pmatrix} 2.156 \\ 2.226 \\ 2.35 \end{pmatrix} \\
 \rho &:= \begin{pmatrix} 1.08 \\ 1.07 \\ 1.03 \end{pmatrix} & b &:= \begin{pmatrix} 0.24 \\ 0.13 \\ 0.16 \end{pmatrix} & dm &:= m1 - m2 & dm &= \begin{pmatrix} 2 \\ 1.8 \\ 1.9 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$$a1 := 0 \quad a2 := 0 \quad a3 := 0 \quad a4 := 0 \quad a5 := 0$$

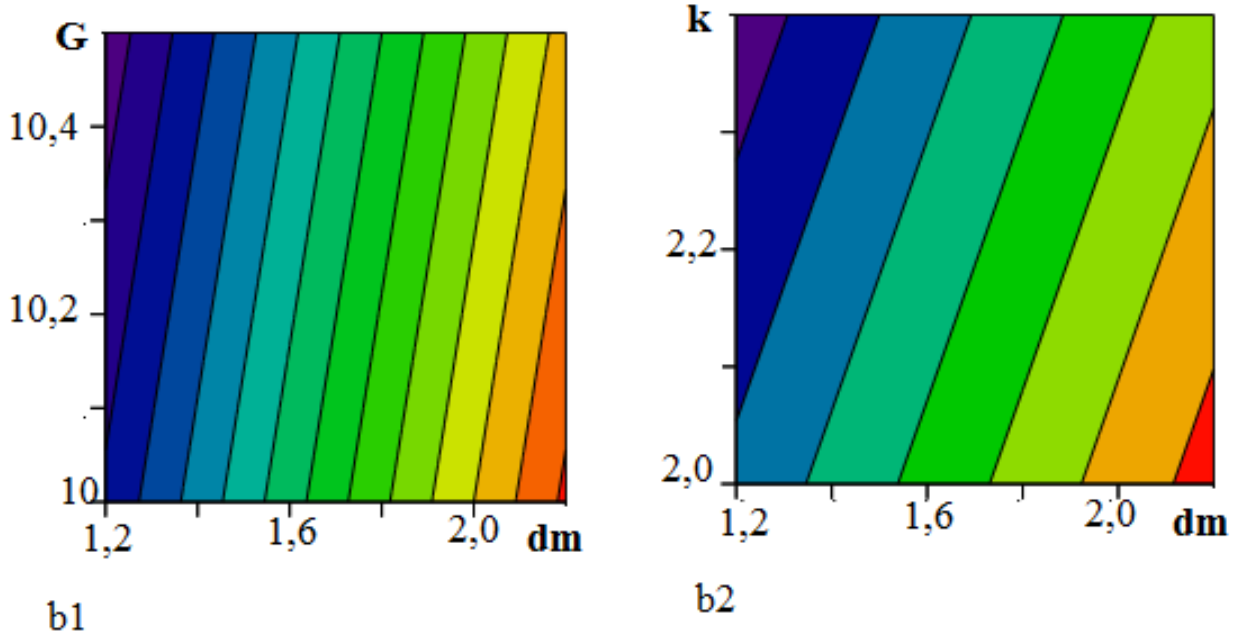
$$\text{Given} \quad b = a1 \cdot dm + a2 \cdot G + a3 \cdot k + a4 \cdot \rho + a5$$

$$\begin{pmatrix} a1 \\ a2 \\ a3 \\ a4 \\ a5 \end{pmatrix} := \text{Minerr}(a1, a2, a3, a4, a5) \quad \begin{pmatrix} a1 \\ a2 \\ a3 \\ a4 \\ a5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.519 \\ 8.422 \times 10^{-3} \\ -0.449 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Лістинг 3

```

G := 10,10.1..11      dm := 1.2,1.3..2.2      k := 2.0,2.1..2.4
b1(dm,G) := 1.1·dm - 0.18·G      b2(dm,k) := 0.52·dm - 0.45·k
i := 0..10      h := 0.1      l := 0..10      j := 0..4
dmi := 1.2 + i·h      Gl := 10 + l·h      kj := 2 + j·h
b1i,l := b1(dmi,Gl)      b2i,j := b2(dmi,kj)
    
```



Діаграми пористості

Розрахункові дані критичної швидкості

Z	X-p	1179	1178	1177	1176	1175	1174	1173	1172	1171	1170
τ	Y-R2	1180									
1,02	0,08	1,311925573	1,710878345	1,760795658	1,767258722	1,768085654	1,76819163	1,768205206	1,768206946	1,768207168	1,768207201
1,6	0,085	1,318012305	1,711682255	1,760899178	1,767271989	1,768087354	1,768191848	1,768205234	1,768206949	1,768207169	1,768207201
2,18	0,09	1,323948126	1,712463494	1,760999827	1,767284886	1,768089006	1,768192206	1,768205261	1,768206953	1,768207169	1,768207201
2,76	0,095	1,329733993	1,713222444	1,761097648	1,76729742	1,768090612	1,768192266	1,768205288	1,768206956	1,76820717	1,768207201
3,34	0,1	1,335372594	1,713959697	1,761192715	1,7673096	1,768092173	1,768192465	1,768205313	1,768206959	1,76820717	1,768207201
3,92	0,105	1,340867789	1,714675979	1,761285118	1,767321437	1,76809369	1,76819266	1,768205338	1,768206963	1,768207171	1,768207201
4,5	0,11	1,346224196	1,715372097	1,761374955	1,767332944	1,768095164	1,768192849	1,768205362	1,768206966	1,768207171	1,768207201

Навчально-методична література

Стадник І. Я., Піддубний В. А.

**ОБГРУНТУВАННЯ НАГНІТАЛЬНОГО
ПРОЦЕСУ
ФОРМУВАЛЬНИХ МАШИН**

Монографія

Комп'ютерне макетування та верстка *А. А. Флейтути*.

Формат 60x90/16. Обл. вид. арк. 12,76. Тираж 300 прим. Зам. № 3303.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.

46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4226 від 08.12.11