

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ГОЛУБКОВ ПАВЛО СЕРГІЙОВИЧ



УДК 637.521.4:007.52(043.5)

**РОЗРОБКА РОБОТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА
ПЕЛЬМЕНІВ СПЕЦІАЛЬНИХ ФОРМ**

Спеціальність 05.18.12 - процеси та обладнання харчових, мікробіологічних
та фармацевтичних виробництв

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

ОДЕСА – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.
Робота виконана в одеській національній академії харчових технологій
Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: - кандидат технічних наук
Єгоров Віктор Богданович,
Одеська національна академія харчових технологій,
кафедра автоматизації технологічних процесів і
робототехнічних систем, доцент кафедри.

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор
Потапов Володимир Олексійович,
Харківський державний університет харчування та
торгівлі Міністерства освіти і науки України, кафедра
холодильної та торговельної техніки і прикладної
механіки, завідувач кафедри;

- кандидат технічних наук
Новіков Павло Валерійович,
Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського, кафедра автоматизації теплоенергетичних
процесів національного технічного університету
України, доцент кафедри.

Захист відбудеться **22 квітня 2021 р. о 13:30** годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради. Одеська національна академія харчових
технологій, за адресою: м. Одеса, вул. Канатна 112, ауд. А-234.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Одеської національної
академії харчових технологій, за адресою: 65039, м. Одеса, вул. Канатна 112.

Автореферат розіслано *22 березня 2021 року*.

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



Т.І. Нікітчина

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На поточний момент сфера створення напівфабрикатів постійно розширюється. Процес отримання напівфабрикатів досить добре відомий і поширений. Дана робота включає в себе розробку роботизованого комплексу по виробництву пельменної продукції особливих форм. Особлива, важко реалізована форма, захищає продукцію від підробки і є гарантією якості виробника. Робота над дисертацією велася в два етапи. Перший - розробка обладнання для виробництва пельменної продукції (ПП). Другий - автоматизація розробленого комплексу. При розробці комплексу, було поставлено два завдання. Перше - досягти важкореалізовуваної форми. Друге - домогтися скорочення економічної складової, на виробництві ПП.

У дисертаційній роботі було розроблене обладнання, яке виробляє: по-перше - пельменну продукцію важкореалізовуваної кубічної форми. По-друге – кубічна форма впливає на скорочення економічної складової, на виробництві ПП при зберіганні та транспортуванні.

Було розроблено 3Д принтер на якому надрукована конструкція проекту куб 2015 и проводились комплексні дослідження на базі системного інжиніринга та дослідження, одночасно механічних, теплових завдань та автоматизація робототехнічного комплексу.

Після розробки обладнання для нього була розроблена система автоматичного керування (САР).

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є створення інноваційного обладнання для виробництва пельменної продукції важкореалізовуваної кубічної форми, та автоматизації комплексу. Розробка обладнання, методи його проектування та керування режимами виробництва пельменів кубічної форми.

Для здійснення поставленої мети необхідно розв'язати наступні основні завдання:

- розробити принципову механічну схему ротаційного апарату для пельменної продукції кубічної форми;
- обґрунтувати концептуальну та параметричну моделі взаємодії механічних та теплових операцій, що впливають на якісні показники пельменної продукції кубічної форми;
- розробити спрощену фізичну модель, яка відображає ключові теплові процеси в системі “фарш – тісто – нагрівач – навколишнє середовище”;
- скласти математичний опис нестационарної задачі теплообміну в системі, що аналізується, надати інженерне спрощення математичної моделі;
- експериментально визначити умови фазових рівноваг вологого фаршу в умовах низьких температур; провести необхідні експерименти та, за їхніми результатами, ідентифікацію математичних моделей динамічних властивостей каналів керування устаткуванням, реалізувати її у формі імітаційної моделі та підтвердити адекватність;

- розробити алгоритми керування, що забезпечують необхідні запаси стійкості та високу динамічну точність, оптимізацію процесу за мінімумом питомих енерговитрат у реальному часі при гарантуванні запобігання аварійних ситуацій, пов'язаних з перегрівом елементів;
- розробити експериментальний зразок роботизованого агрегату для виробництва пельменної продукції кубічної форми та провести його випробування;
- розробити загальну концепцію побудови ефективної системи керування процесом виробництва, включаючи концептуальну модель об'єкту керування та функціональну структуру її керуючого пристрою;
- провести необхідні експерименти та, за їхніми результатами, ідентифікацію математичних моделей динамічних властивостей каналів керування устаткуванням як об'єкту керування, реалізувати її у формі імітаційної моделі та підтвердити адекватність;
- розробити алгоритми керування, що забезпечують необхідні запаси стійкості та високу динамічну точність реалізації функції регулювання, оптимізацію процесу за мінімумом питомих енерговитрат у реальному часі при гарантуванні запобігання аварійних ситуацій, пов'язаних з перегрівом нагріваючих елементів; розробити програмно-технічне забезпечення макетного зразка автоматичної системи керування, інтегрованого до автоматизованого робочого місця дослідника процесу виробництва пельменної продукції, який реалізує розроблені алгоритми, провести його лабораторні випробування.

Об'єкт дослідження – роботизований агрегат для виробництва пельменної продукції кубічної форми.

Предмет дослідження – комбіновані процеси механічних та теплових взаємодії режимів, системи автоматичного керування технологічним процесом виробництва пельменної продукції.

Методи дослідження:

- теорія подібності, методи теплофізичного моделювання, експериментальне моделювання із використанням контрольно-вимірювальної апаратури та комп'ютеризованих систем збору та обробки теплофізичної інформації, детермінізовані методи математичного моделювання нестационарних процесів теплопередачі, програмно-технічного синтезу комп'ютерних інформаційно-керуючих систем та комп'ютерної обробки зображень;
- планування та проведення натурних експериментів, обробки їхніх результатів та ідентифікації моделей; теорії систем із запізненням, теорії систем гарантуючого керування, теорії цифрових систем керування; імітаційного моделювання систем керування;
- загальні теорії систем, зокрема їхнього функціонально-структурного аналізу програмно-технічного синтезу комп'ютерних інформаційно-керуючих систем та комп'ютерної обробки зображень; теорії автоматичного керування та її підрозділів – статистичної теорії автоматичних систем, теорії систем із запізненням, теорії систем гарантуючого керування, теорії цифрових систем керування.

Наукова новизна одержаних результатів. В роботі сформульовано та доказано наукове положення: «Створення роботизованого комплексу для виробництва пельменів має здійснюватись на принципах системного інжинірингу, вирішення та узгодження вже на стадіях проектування термомеханічних процесів із проблемами автоматизованого керування агрегатом, при цьому, ключовим параметром є температура тіста, який поєднує теплові, механічні та динамічні моделі автоматизації, а комплексний параметр якості визначається за аналізом поверхні, форми та об'єму готового продукту на базі комп'ютерного зору». Реалізація наукового положення базується на двох сформульованих та доказаних в роботі гіпотезах:

«При формуванні пельменної продукції в агрегаті залучити принцип використання двох тістових стрічок, які рухаються та обгортають сторони куба»; «Скорочення витрат енергії можна досягти за рахунок вилучення із технології одного процесу розморожування при використанні в агрегаті фаршу кубічної форми у замороженому вигляді».

У результаті комплексу аналітичних, експериментальних і виробничих досліджень вперше:

- обґрунтовано принцип формування пельменів у виді кубу і фаршу у замороженому вигляді;
- створено концептуальну, параметричну, фізичну, математичну та імітаційну моделі процесу виробництва пельменної продукції;
- визначено умови фазових рівноваг у структурі фарш-волога;
- запропонована інженерна методика розрахунку процесів теплопередачі в системі фарш-тісто-хват нагрівач-навколишня середа;
- запропоновано загальну концепцію побудови ефективної системи автоматичного керування процесом виробництва, включаючи концептуальну модель об'єкту керування та варіанти функціональної структури її керуючого пристрою, яка дозволяє розробляти такі системи автоматичного керування для апаратів з різним набором доступних для неперервної зміни керуючих впливів та джерел безперервної інформації про показники якості продукції;
- визначені показники, що характеризують його якість побічно, але доступні квазінеперервного виміру безпосередньо в ході процесу, які дозволяють у реальному часі автоматично стабілізувати значення основних показників якості продукції в умовах інтенсивних неконтрольованих збурень за показниками якості його сировини;
- приведено комплекс комп'ютерного моделювання адекватно описуючий динаміку каналів регулювання, яка дозволяє при розробці проводити комп'ютерні експерименти з налагодження та параметричної оптимізації алгоритмів керування і за порівняльним аналізом її варіантів;
- розроблено систему контролю процесів виготовлення пельменної продукції та комплекс контролювання якості пельменної продукції на базі термодатчиків, комп'ютерного зору;

вперше розроблено:

- імітаційну ММ процесу керування агрегатом “куб 2015”, що адекватно описує динаміку каналів регулювання, яка дозволяє при розробці САК

проводити комп'ютерні експерименти з налагодження та параметричної оптимізації алгоритмів керування за порівняльним аналізом її варіантів;

- структури підсистем автоматичного регулювання температурного режиму теплової обробки сировини, що надходять до апарату, з декількома взаємопов'язаними зонами нагрівання, які дозволяють перерозподілити ресурси теплової енергії, що підводиться від електричних нагрівачів по цих зонах та, за рахунок цього, підвищена точність керування температурою нагрівання в останній зоні;

- обладнання роботизованого комплексу “куб 2015”, та створено прототип агрегату.

Практичне значення одержаних результатів полягає у: створенні роботизованого комплексу виробництва пельменної продукції кубічної форми на базі модульно-ротаційного принципу:

- підвищенні продуктивності та енергетичної ефективності процесів ППП, підвищенні та стабілізації якості продукції, гарантованому запобіганні аварійних ситуацій, пов'язаних з порушенням обмежень на регламентовані змінні, зокрема на тепловий стан нагрівачів;

- можливості застосування розроблених та апробованих підходів, включаючи їхній функціональний склад, структури та алгоритми підсистем, для підвищення енергетичної ефективності на основі керування іншими типами обладнання;

- застосуванні розробленої імітаційної моделі для подальшого удосконалення САК “Куб 2015”, а також технології та досвіду розробки цієї моделі для створення моделей інших типів.

Апробації результатів дисертаційної роботи. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на Міжнародній науковій конференції «Съюз на учените - Русе». у Русенському університеті «Ангела Кынчева», (Болгария, Русе, університет «Ангела Кынчева», 2015), та у щорічних конференціях Одеської національної академії харчових технологій (ОНАХТ) у 2015-2019 рр.: на XIII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології та автоматизація» (Одеса, ОНАХТ, 2015), Міжнародній науково-практичній конференції «Харчові технології, хлібопродукти і комбіорма». (Одеса, ОНАХТ, 2016), 78 Наукова конференція викладачів академії «Наукова постерна сесія» (Одеса, ОНАХТ, 2018), науково-практична конференція Енергія. Бізнес. Комфорт. (Одеса, ОНАХТ, 2019).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані у 18 друкованих працях, включаючи 9 робіт у фахових виданнях МОН, 1 стаття у міжнародному виданні, тези 8 доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, основного змісту, що включає 4 розділи, висновків, списку використаних джерел із 167 найменувань. Загальний обсяг роботи – 235 сторінок. Основна частина складає 221 сторінку, включаючи 77 рисунків та 4 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, показано її зв'язок з науковими напрямками та темами, сформульовано мету та задачі дослідження, встановлено межі об'єкту та предмету дослідження, перераховано методи дослідження, які застосовувалися в роботі, її наукові результати, ступінь їхньої новизни та практичне значення, перераховано особистий внесок здобувача в публікаціях за темою дисертації, перелік конференцій, де проводилася апробація результатів, дано загальну інформацію про публікації, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі «Сучасний рівень та проблеми обладнання для виробництва пельменної продукції» наведено розвиток ринку пельменної продукції, специфіку процесів формування пельменів та обладнання для їх виробництва. Визначено тенденції розвитку пельменного обладнання, світові флагмани на ринку. Розглядаються технологічні аспекти виробництва, специфіку та ключові регламентації технологій. Показано перспективи випуску пельменної продукції специфічної форми, наприклад кубічної.

У другому розділі «Об'єкти та методи досліджень» наведено наукове положення, що базується на 2 гіпотезах. Дана характеристика лінії для виробництва пельменів із об'єктом, що досліджується – роботизованим пельменним агрегатом. Наразі, при виробництві напівфабрикатів, в основному лінія виглядає наступним чином: сировина (м'ясо, борошно та інгредієнти) надходять на склад. М'ясо надходить в охолодженому або замороженому вигляді і розморожується для первинної (холодної обробки), після чого м'ясо знову заморожується і надходить на склад. Традиційно перед тим, як приступити до виробництва ПП, м'ясо знову розморожується, і з нього отримують фарш, який направляється на лінію створення ПП, а після направляють на охолодження, на склад готової продукції.

Запропоновано, розробити обладнання, що може використовувати фарш в замороженому вигляді, без повторного розморожування. Таким чином відмінності запропонованої лінії в тому, що на складі, м'ясо розморожується для первинної обробки, після чого формується в кубічну форму, проходить шокову заморозку, і надходить в холодильні камери, в яких напівфабрикат може зберігатися при температурі -13°C від 3-х до 8-ми місяців, в залежності від змісту виду м'яса (яловичина, свинина), і при -30°C від 15-ти місяців до 2-х років, відповідно. Фаршеві заготовки надходять на лінію виробництва ПП без повторного розморожування, в замороженому вигляді з температурою від -13°C до -30°C . Що в свою чергу є нормою для виробництва ПП категорії А. У нашій роботі, було враховано, що м'ясо і тісто є досить специфічним сировиною. Характерними особливостями є те, що вони мають багатокомпонентний склад, є повноцінним джерелом білка, містять високу біологічну активність, неоднорідну будову, а при впливі зовнішніх факторів, можуть змінювати свої характеристики.

Тісто при виробництві ПП повинно мати температуру не нижче 20°C , тому що в іншому випадку зліпка швів не буде проводитися і напівфабрикат матиме виробничі дефекти, що для ПП категорії А неприпустимо. Виходячи

із запропонованої науково-технічної ідеї для розробленого об'єкту (пельменного агрегату) спланована програма досліджень (рис.1).

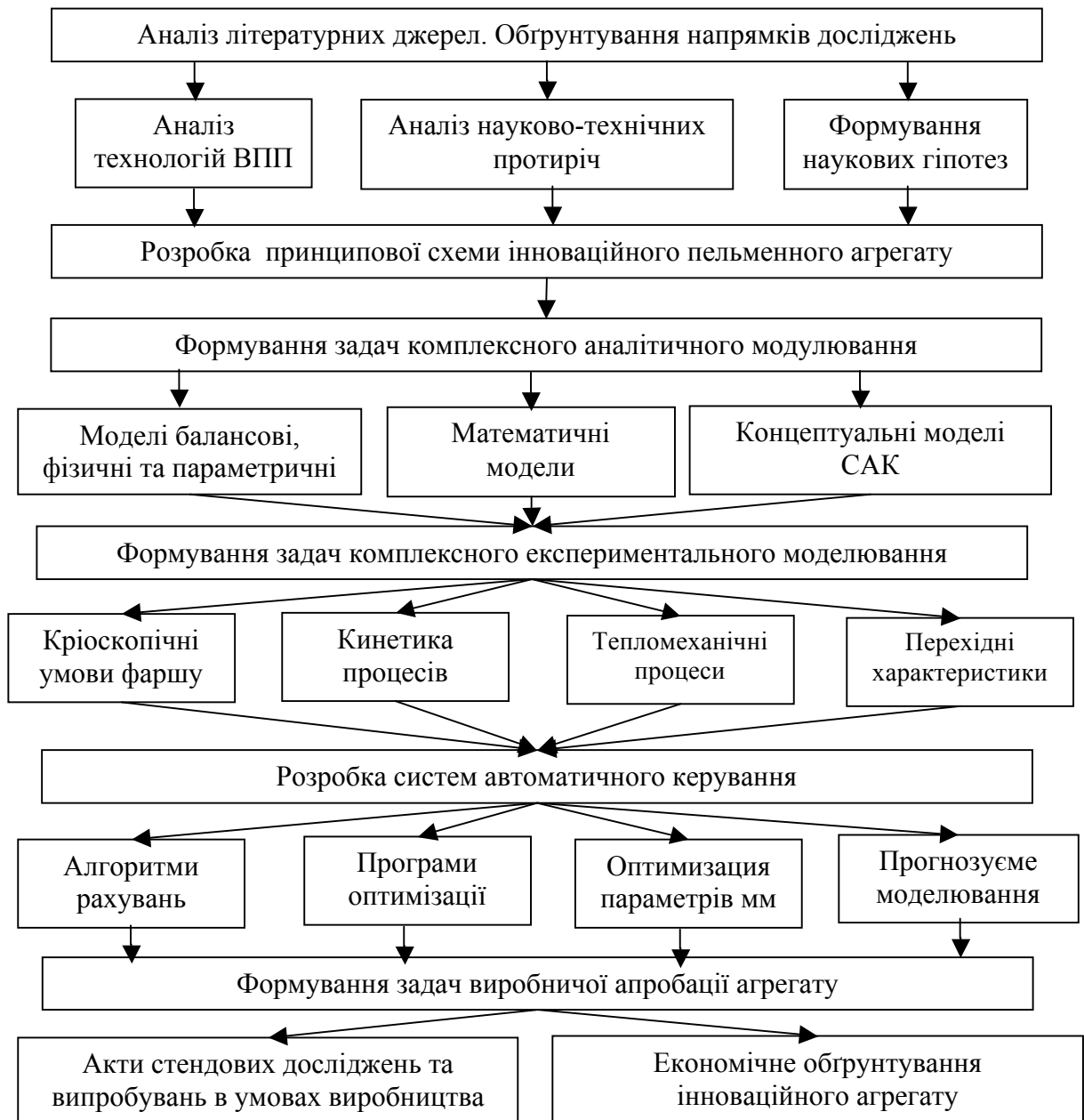


Рис.1 Програма досліджень.

Методологія (рис.1) передбачає широке використання методів аналітичного моделювання на першому етапі досліджень, комплексне із цим розв'язання завдань по надійному управлінню агрегатом. Все це має спростити шлях до реалізації завдання по створенню інноваційної розробки.

Таким чином, методологія передбачає комплексне узгодження механічних та теплових процесів, забезпечення яких є завданням для інноваційної системи автоматичного керування.

Апарат з виробництва пельменної продукції особливої кубічної форми (Рис.2), являє собою апарат барабанного типу зі швидкістю виробництва ПП 600-1200 штук на годину, вага одного пельменя особливої форми становить

12 грам, при розмірах 22x22x22мм. 3Д модель ППОФ «Куб-2015» наведено на (Рис 2) До складу апарату, так само входить пневматичний виконавчий механізм і компресорне обладнання. Транспортери поставляють заморожений фарш в апарат і в морозильну камеру з апарату. Тісто подається з стрічкоформовочної машини в верхню і нижню камери формування ПП.

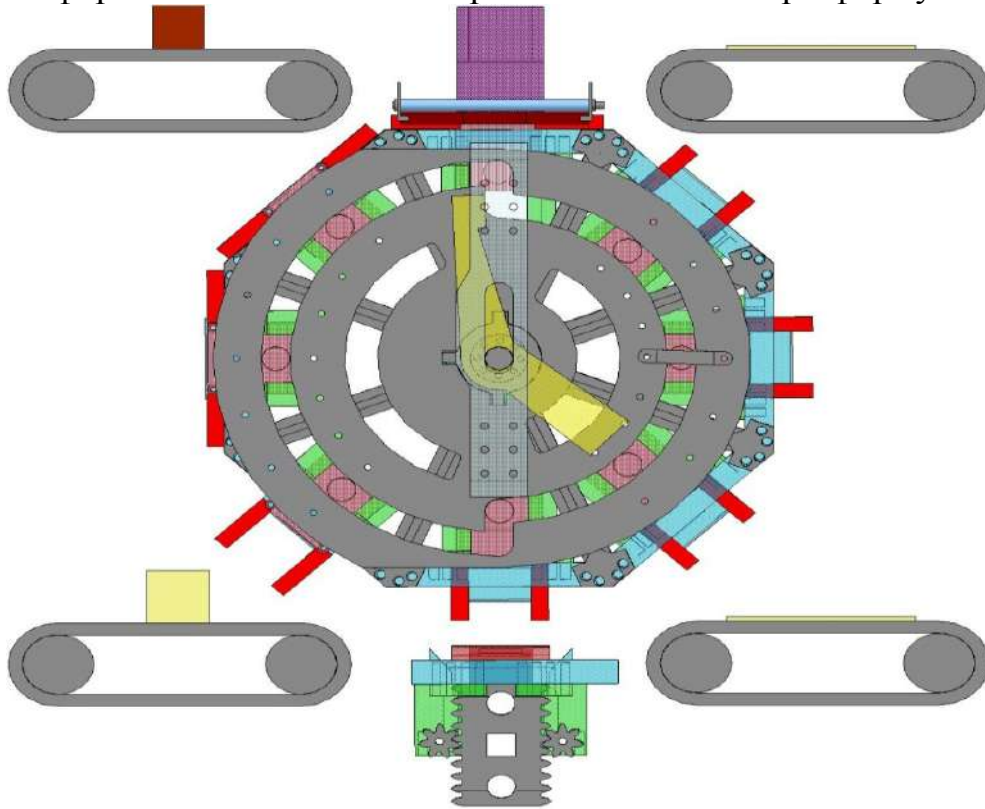


Рис. 2 – Обладнання для виробництва пельменної продукції особливих форм.

Звісно, робота обладнання з виробництва ПП неможлива без роботи допоміжного обладнання, такого, як морозильні камери з підготовленим фаршем і готові прийняти вироблену продукцію. Необхідно транспортне, тістомісильне і стрічкоформовочне обладнання. Починати процес виробництва пельменної продукції (ВПП) особливих форм, можливо не раніше, ніж за 5 годин підготовчих робіт. Узгоджена робота всіх елементів схеми – завдання системи автоматичного керування (САК).

За хвилину знаходження тіста з температурою в 25 градусів при зіткненні з фаршем, який має температуру (-13) градусів охолоне, що негативно вплине на формування швів при ліпленні в нижній камері і, відповідно, може спричинити за собою збільшення часу необхідного на ліплення, що в свою чергу спричинить за собою збільшення часу виробництва ПП.

Таким чином, надійна робота агрегату потребує вирішення температурного регламенту тіста та фаршу. Тісто не повинне охолоджуватись, а фарш не має розморожуватись. Якщо температурні режими тіста відомі, то кріоскопічні умови для фаршу необхідно визначити.

Методи аналітичного моделювання базувались на феноменологічних принципах. Для елементів фізичної схеми складалась система диференціальних рівнянь із відповідними граничними, початковими та фізичними умовами.

Результатом роботи було поле температур в системі «фарш – хват – нагрівач – довкілля».

Методи експериментального моделювання розділялись на задачу визначення умов фазової рівноваги для м'ясного фаршу, та методи імітаційного комп'ютерного експерименту. За першою задачею методика включала: підготовка фаршу та стенда, стабілізація температури в морозильній камері, формування дослідного зразка фаршу, розміщення термодатчиків **Термістори NTC M F58-104** в центрі куба та на його поверхні, підключення термодатчиків через контролер **Raspberry P3** до планшету. Після підготовки фарш із датчиками розміщується в морозильній камері та включається система збору інформації. Періодично дистанційно вимірюється температура поверхні фаршу тепловізором **FLIR TG54**. Проведено оцінку похибок вимірювання.

У **третьому розділі** «Моделювання комбінованих тепломеханічних процесів в агрегаті» наведено результати аналітичних, експериментальних та імітаційних досліджень. По-перше визначено за допомогою параметричної моделі (рис.3) групи параметрів, що впливають на показники якості: температуру тіста (T_t) та комплексний параметр комп'ютерного зору (j).

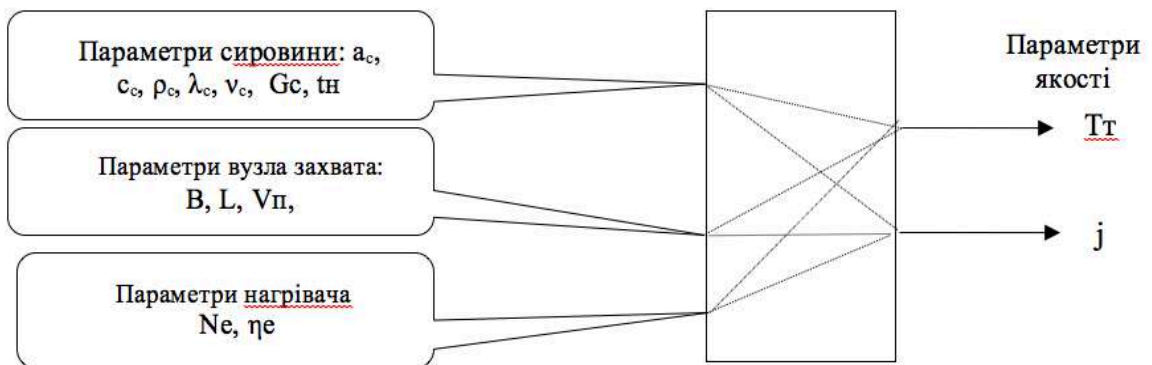


Рис.3. Параметрична модель агрегату Куб 2015.

З точки зору САК модель (рис.3) доповнюється ще параметрами збурення та каналами керування. Важливо, що склад і характеристики замороженої сировини змінюються. Характеристики сировини, навіть у рамках однієї рецептури, завжди відрізняються друг від друга та динамічно змінюються в часі. Це істотно ускладнює процес керування. Ці збурення «за температурою сировини» призводять не тільки до змін значень режимних (регламентованих) змінних, які усуваються в рамках функції регулювання, але й до змін динамічних властивостей каналів регулювання, оптимальних значень регульованих змінних, діапазонів їхньої гранично-припустимої зміни. У таких умовах ефективне керування процесами ВПП вимагає застосування САК з більш розвинутою функціональною організацією і більш досконалими алгоритмами, чим для звичайних процесів ВПП.

На основі схеми (рис.3) запропоновано фізичні моделі (рис.4). Вважається, що задача віссиметрична із основними елементами «хват – стрічка тіста – пів об'єму фаршу».

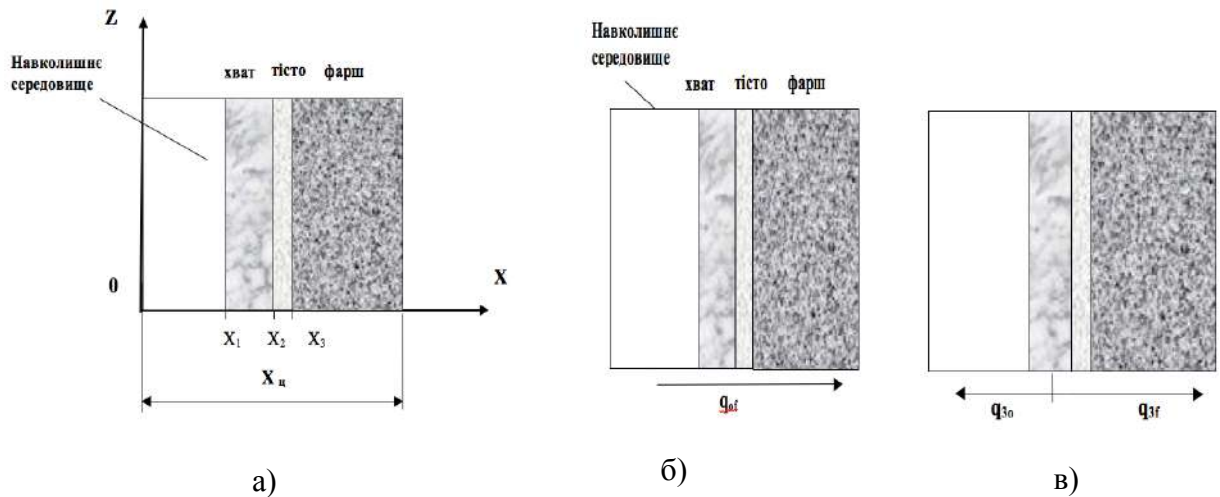


Рис.4. Постановка задачі моделювання.

Розглядається фізична модель із відповідними координатами (рис.4, а), та модель теплопередачі із вимкнутими нагрівачами (рис.4, б) та при роботі нагрівачів (рис.4, в), коли тепловий потік від нагрівачів (q) передається і фаршу, і навколишньому середовищу.

Стационарна задача, тепловий баланс схеми записується за 1 законом термодинаміки:

$$Q_{cm} + QV = \Delta U, \quad (1)$$

де: Q_{cm} – кількість теплоти, віддане тілом через поверхню контакту (S); Q_V – кількість теплоти, що поглинається продуктом від електричних джерел енергії; ΔU – зміна внутрішньої енергії.

Кінетика процесу теплообміну розглядається за умов:

зона 1 – навколишнє середовище з координатами $0 \leq X \leq X_1$; $0 \leq Z \leq Z_1$; і з температурою – t_c ;

зона 2 – хват з координатами $X_1 \leq X \leq X_2$; $0 \leq Z \leq Z_1$; і з текущою температурою – t_3 ;

зона 3 – тісто з координатами $X_2 \leq X \leq X_3$; $0 \leq Z \leq Z_1$; і з текущою температурою – t_T ;

зона 4 – фарш з координатами $X_3 \leq X \leq X_{\Pi}$; $0 \leq Z \leq Z_1$; і з текущою температурою – t_{Φ} .

Математична модель теплових режимів агрегату визначає нестационарні поля температур у вигляді системи диференціальних рівнянь.

Для 4 зони (фаршу) звісно: об'єм продукту V_1 ; енергія $N=0$, температура – t_{Φ} .

Для висот $0 \leq Z \leq Z_1$; координат $X_3 \leq X \leq X_{\Pi}$:

$$\frac{\partial t_f}{\partial \tau} = a_1 \left(\frac{\partial^2 t_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_f}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

Початкові умови ($\tau = 0$): $t_1 = t_{\Pi}$

де $a = \lambda / (c_v \rho)$ – коефіцієнт температуро провідність, m^2/s .

$$\frac{\partial t_T}{\partial \tau} = a_T \left(\frac{\partial^2 t_T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_T}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

Для зони 3 (тіста) (1 етап, $N=0$)

На етапі 2 вмикаються нагрівачі та енергія, потребляємо продуктом, рівня $N\eta\tau$

$$\frac{\partial t_T}{\partial \tau} = a_T \left(\frac{\partial^2 t_T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_T}{\partial z^2} \right) + \frac{N\eta}{V_T c_T \rho_T}, \quad (4)$$

Для зони 1 (довкілля) моделюється конвективний теплообмін “поверхня хвату – повітря”.

Рівняння енергії

$$\frac{\partial t_B}{\partial \tau} = a_B \left(\frac{\partial^2 t_B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_B}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_B}{\partial z^2} \right), \dots\dots\dots (5)$$

Рівняння суцільності

$$\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (6)$$

Рівняння Навьє-Стокса

$$\rho w \text{grad} w = \rho g - \text{grad} P + \mu \nabla^2 w \dots\dots\dots (7)$$

Шукана температура визначається за умов суперпозиції. Наведені рівняння доповнюються умовами однозначності, що враховують теплофізичні властивості елементів всіх зон, та початковими умовами (табл.1).

Таблиця 1

Граничні умови

ГРАНИЦЯ	ГУ	РІВНЯННЯ
1 и 2 зон	3 рода	$\frac{\partial t_B}{\partial \tau} = -\frac{\alpha_B}{\lambda_3} (t_B - t_3)$ (8)
2 и 3 зон	4 рода	$\lambda_3 \left(\frac{\partial t_3}{\partial X} \right)_3 = \lambda_T \left(\frac{\partial t_T}{\partial X} \right)_T$ (9)
3 и 4 зон	4 рода	$\lambda_T \left(\frac{\partial t_T}{\partial X} \right)_T = \lambda_f \left(\frac{\partial t_f}{\partial X} \right)_f$ (10)

Отримано нестационарну модель у вигляді системи диференційних рівнянь (2-7) із відповідними умовами однозначності (8-10). Вирішення системи рівнянь навіть із сучасними можливостями комп'ютерних технологій не можливе. Проблеми у зміні властивостей і, навіть структури сировини, наявність у системі рівняння Навьє-Стокса. Необхідне подальше спрощення моделі. Перехід до квазістационарної моделі із використанням

методів електротеплової аналогії інженерна методика розрахунку теплових режимів агрегату (Рис 7)

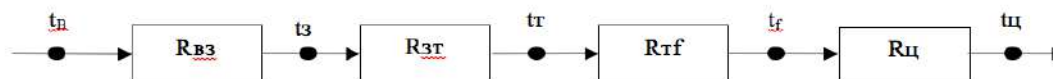


Рис. 7. Електротеплова модель схеми переносу теплоти.

Відповідні термічні опори визначають за табл.2.

Таблиця 2

Термічні опори системи “фарш – тісто – хват – довкілля”

№	Ділянка	Рівняння
1	Повітря довкілля – поверхня хвата	$R_{B3} = \frac{1}{\alpha F_3}$, (11)
2	Поверхня хвата – поверхня тіста	$R_{3T} = \frac{\delta_3}{\lambda_3 F_3}$, (12)
3	Поверхня тіста – поверхня фаршу	$R_{Tf} = \frac{\delta_T}{\lambda_T F_3}$, (13)
4	Фарш	$R_{ц} = \frac{\delta_4}{\lambda_f F_3}$, (14)

Розроблена концептуальна модель процесу ВПП виявила важливі для ОК особливості: а) високий рівень неповноти інформації про стан процесу і наслідки управляючих впливів; б) суттєве обмеження ресурсів на управління процесом; в) високий рівень невизначеності властивостей апарату по ВПП як ОК.

Структурна схема (рис.8), як графічна форма концептуальної моделі, відбила в зручній формі взаємозв'язку входних, внутрішніх і вихідних змінних ОК. Її аналіз розкрив фізичну сутність властивостей і характер цих взаємозв'язків. Очевидно, що конструктивний підхід до розробки ефективної САК повинен бути адекватний проблемам, і, перш за все, повинен бути системним, в нашому випадку системнофункціональним.

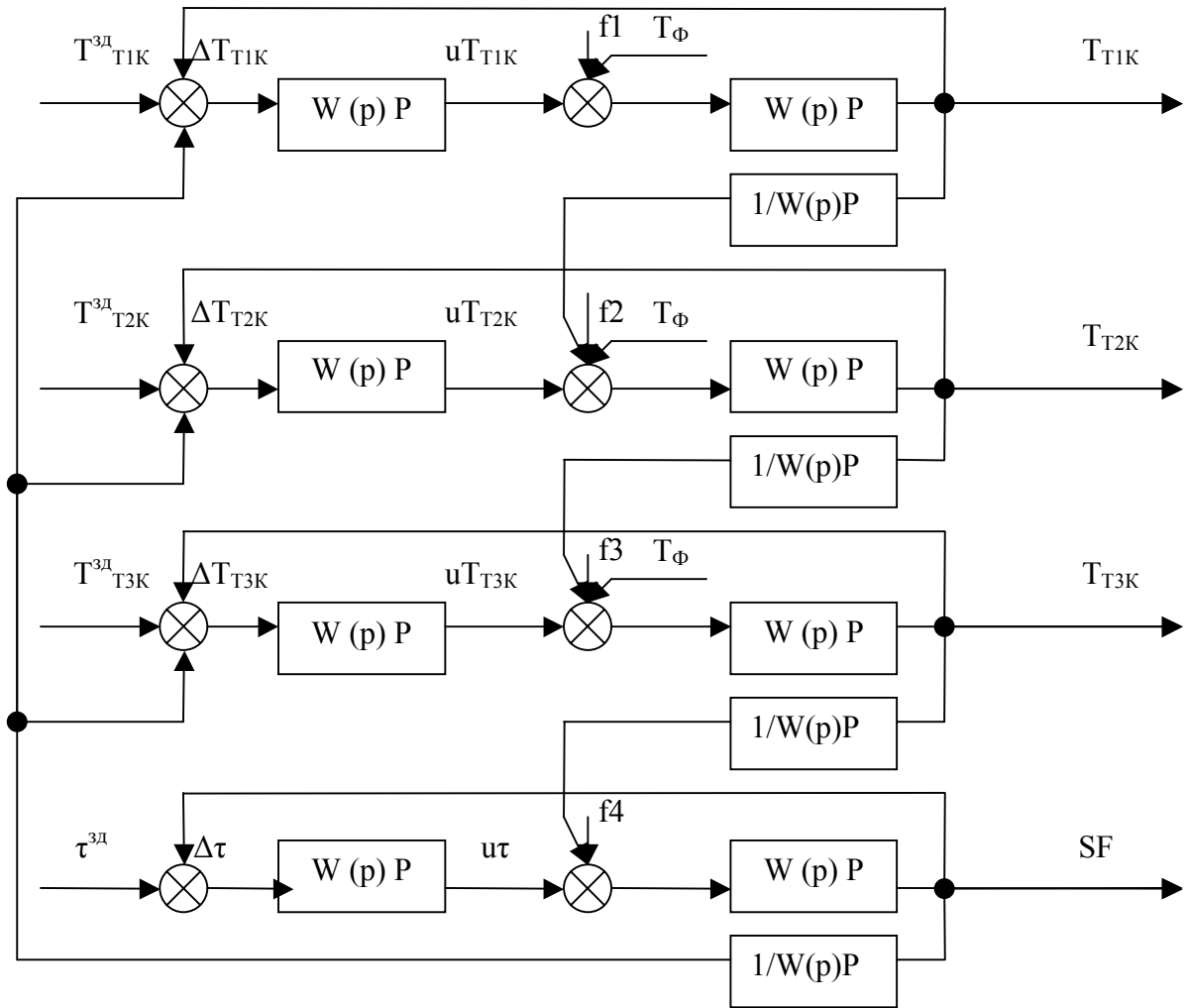


Рис. 8. – Структурна схема концептуальної моделі процесу виробництва пельменної продукції як ОК де: $\tau^{3д}$ – час формування заданий; S^F – форма пельменя на комп'ютерному зорі; $T^{3д}_{Т1К}$ – температура тіста в першій камері задана; $T_{Т1К}$ – температура тіста в першій камері; $T^{3д}_{Т2К}$ – температура тіста в другій камері задана; $T_{Т2К}$ – температура тіста в другій камері; $T^{3д}_{Т3К}$ – температура тіста в третій камері задана; $T_{Т3К}$ – температура тіста в третій камері; $f_1 - f_5$ – неконтрольовані обурення; T_f – неконтрольована температура фаршу.

В рамках такого підходу, методологічну основу складають поняття «функціональна організація системи» і «розвиток системи в напрямку підвищення функціональної цілісності». Рішення проблеми потребує розширення складу функцій, що реалізуються системою за рахунок функцій оптимізації, вимірювання непрямих показників якості пельменя в реальному часі і покращення реалізації традиційних функцій, тобто функцій регулювання.

Далі наведено результати комплексних експериментальних досліджень, отриманих на стендовому обладнанні та при комп'ютерному моделюванні. На рис. 9 наведено результати експериментального моделювання фазових

рівноваг системи “фарш - вода” . досліди проводились за методикою, що обговорювались у розділі 2.

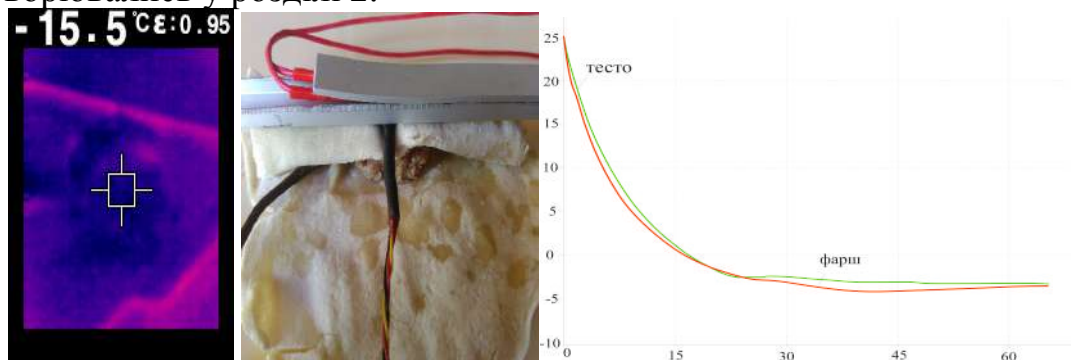


Рис.9. Дані тепловізора. Фото робочої дільниці. Кріоскопична лінія.

Визначено, що кріоскопична температура фаршу становить -4°C . Таким чином визначена гранична температура фаршу, яка не має бути перевищена.

Проведено моделювання продуктивності лінії, яка безпосередньо залежить від часу необхідного, для завершення схоплення швів при ліпленні пельменя в камері барабана, простою обладнання, яке може змінюватися, відповідно до технологічного регламенту в 4 рази, від 1 до 4 секунд. Для подачі сировини в апарат необхідний час, який в залежності від інгредієнтів тіста і фаршу може змінюватися в 2 рази, от 3 до 6 секунд. Час, витрачений на виконання операції виконавчим механізмом, становить 2 секунди на обидва напрямки. Крім того, з верхньої в нижню камеру пельменна продукція поступає за 5 тактів роботи барабана. У підсумку, час, витрачене на переміщення може істотно відрізнитися для різних видів продукції, що виробляється і складати, на виробництво однієї одиниці від 6 до 12 секунд, а час, проведений в барабані фаршу з 50% нанесеним тістом буде відповідно складати від 30 до 60 секунд. Проведено аналіз циклів роботи пневматичного механізму.

За деталізованими структурними схемами проведено імітаційне моделювання процесу Отримано перехідні характеристики імітаційної моделі за умов температури фаршу (-15 та -30°C). Робота сил (моментів) необхідна для обертання барабана і висунення хватів тиском перетворюється, в кінцевому підсумку, в тепло. За рахунок припливу цього тепла відбувається нагрів тіста, конструктивних елементів хвата і навколишнього середовища.

У четвертому розділі «Системний інжиніринг та рекомендації до впровадження» приведено етапи створення роботизованого пельменного агрегату. За результатами попередніх розділів визначено принципи конструкції. Для виготовлення дослідного зразка агрегату було створено оригінальний 3D принтер, на якому розроблене в 3Д системі проектування обладнання реалізована конструкція (рис.10).

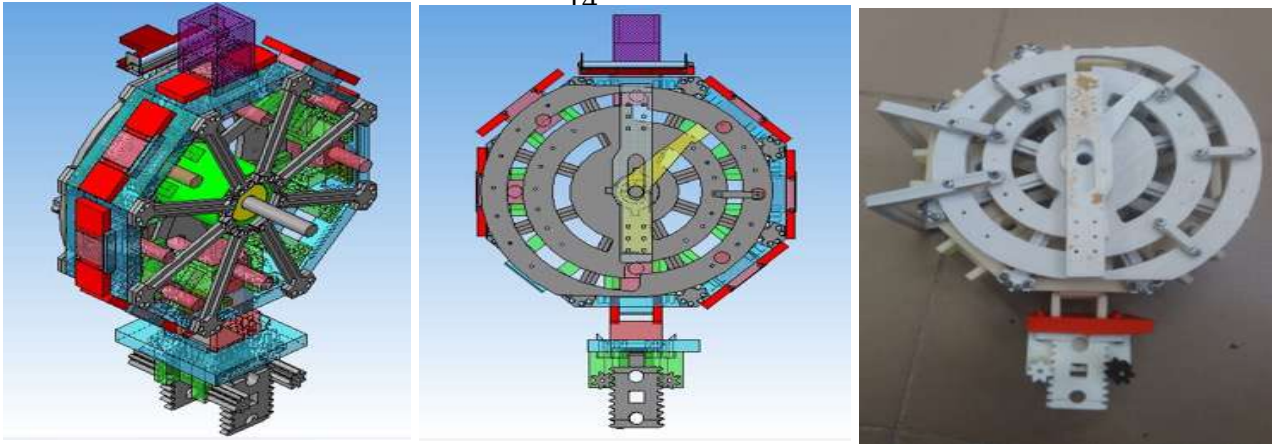


Рис. 10. Фото розробки обладнання для виробництва пельменної продукції особливих форм.

Находячи в верхню камеру формування тісто (з температурою 20...25 градусів) контактує із замороженим до температури -15...-30 градусів фаршем. Тісто починає остигати і до моменту надходження в першу зону вже не може зліплюватися в короткий проміжок часу. Тому датчики визначають температуру тіста і термоелементи на лапах хвата починають підігрівати тісто (рис.11).

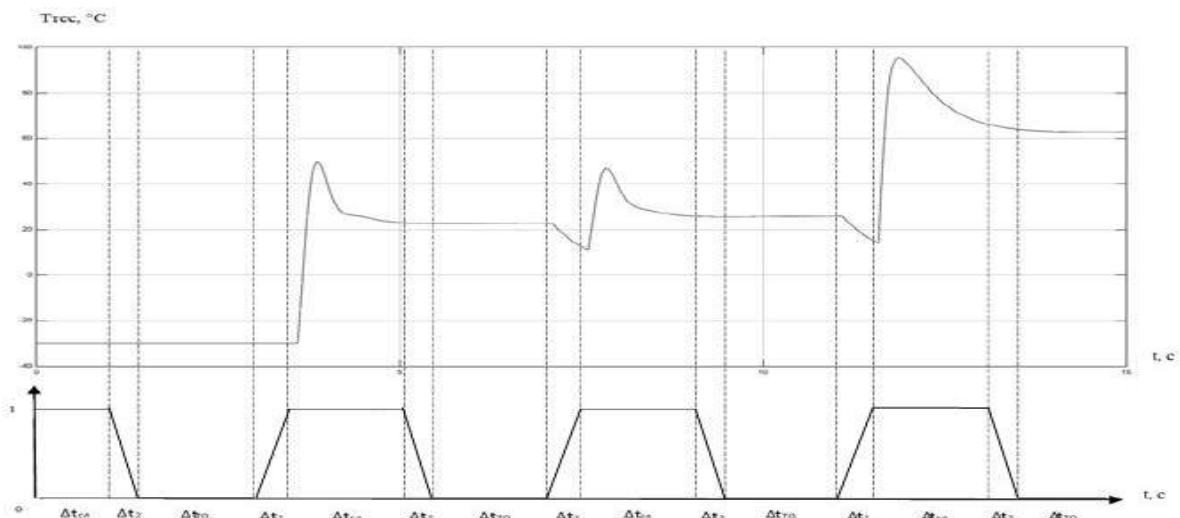


Рис. 11. Перехідні характеристики імітаційної моделі з циклами роботи пневматичного виконавчого механізму.

Розроблений відео канал істотно розширює можливості ефективного управління цим процесом (рис 12), що особливо важливо в умовах невизначеностей характеристик вихідної сировини і поточного стану обладнання. Визначені за його допомогою змінні, хоча тільки побічно характеризують якість готового продукту ВПП, але вони обчислюються практично в режимі реального часу і без запізнення. Останнє дозволить забезпечити високу якість динамічних процесів управління, а, отже, і якість готової продукції.

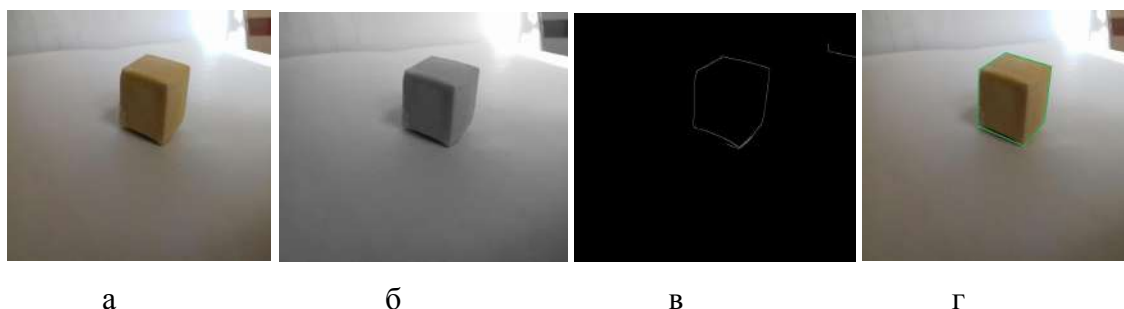


Рис 12. Алгоритм роботи обробки зображення
 а - Об'єкт для ідентифікації; б - Зниження шумів; в - Знаходження контуру; г - Виявлення контуру

ВИСНОВКИ

1. В роботі сформульовано і доведено науково-технічну ідею, що при створенні роботизованого комплексу для виробництва пельменів необхідно використовувати принципи системного інжинірингу із комплексним та одночасним аналізом термомеханічних процесів та проблем автоматизації. Обґрунтовано, що температура тіста є базовим параметром, який поєднує кінетичні тепломеханічні та динамічні моделі автоматизації. Сформульовано і доведено гіпотези можливості формування пельменної продукції за використанням двох тістових стрічок, які рухаються та обгортають сторони куба, який поступає у замороженому стані, що скорочує витрати енергії за рахунок вилучення із технології одного процесу розморожування.

2. В результаті аналізу фізичної схеми процесу запропонована параметрична модель, параметрами якості в якій прийняті температура тіста та питомі витрати енергії. Математична модель тепло переносу в системі фарш – тісто – нагрівач – навколишнє середовище включає статичні і кінетичні моделі, розроблені для процесу виробництва пельменної продукції.

3. Проведено спрощення нестационарної задачі теплообміну, запропонована інженерна методика розрахунку процесів, в основі якої визначення термічних опорів елементів агрегату та умов на їх границях.

4. Розроблено експериментальне обладнання і відповідні методики для дослідження умов фазових рівноваг вологого фаршу при низьких температурах, експериментально визначено, що криоскопічна температура фаршу дорівнює $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, яка прийнята за значення граничного температурного режиму на поверхні фаршу.

5. Використання системи трьохмірного проектування конструкції карусельного агрегату для пельменної продукції кубічної форми дозволило на стадії моделювання відпрацювати режими механічної взаємодії елементів розробки, оптимізувати циклограми установки, визначити конструктивні параметри агрегату «куб 2015».

6. Проведено ідентифікацію математичних моделей динамічних властивостей каналів керування агрегатом «куб 2015», реалізовано її у формі імітаційної моделі.

7. В результаті комплексних досліджень теплообмінних, механічних, імітаційних моделей на розробленому 3Д принтері проведено монтаж дослідного зразка карусельного роботизованного агрегату для пельменної продукції кубічної форми «куб 2015» потужністю 3600 пельменів на годину.

8. Стендові випробування дослідного зразка роботизованного агрегату «куб 2015» показало, що розроблені алгоритми керування забезпечують необхідні запаси стійкості та високу динамічну точність реалізації функції регулювання, оптимізацію процесу за мінімумом питомих енерговитрат у реальному часі при гарантуванні запобігання аварійних ситуацій, пов'язаних з перегрівом нагріваючих елементів.

9. Результати комплексних випробувань роботизованного агрегату «куб 2015» підтвердили адекватність теплових, механічних та імітаційних моделей, показали узгодженість характеристик імітаційної моделі з циклами роботи пневматичного виконавчого механізму.

10. Контроль якості готових пельменів показав, що розроблений відео канал, який працює за алгоритмом «зниження шумів - знаходження контуру - виявлення контуру» забезпечує ефективне управління процесом виробництва пельменів на роботизованному агрегаті «куб 2015».

Список опублікованих праць за темою дисертації.

1. Голубков П.С., Єгоров В.Б., Анализ развития промышленной робототехники в мире // Автоматизация технологических и бизнес – процесів. –Одеса, 2015. –Volume 7. –Issue 2. -С. 4-7 **Особистий внесок здобувача:** Підготовлена стаття до друку. Проведено літературний пошук.
2. Голубков П.С., Єгоров В.Б., О.Г. Бурдо., Путников Д.В., Интеграция робототехнического комплекса производства замороженных полуфабрикатов особых форм // Refrigeration Engineering and Technology. –Одеса, 2018. – Volume 54. –Issue 4. -С. 62-72 **Особистий внесок здобувача:** Розроблено схему експериментальної установки, методика досліджень, забезпечення її виконання, узагальнення її результатів.
3. Голубков П.С., Єгоров В.Б., Синтез системы автоматического управления робототехническим устройством для приготовления полуфабрикатов пельменной продукции особых форм // Автоматизация технологических и бизнес – процесів. – Одеса, 2018. –Volume 10. –Issue 4. -С. 32-39 **Особистий внесок здобувача:** Розроблено обладнання для виробництва. Поставлені завдання для моделювання процесів. Розроблено систему керування обладнанням.
4. Голубков П.С., Єгоров В.Б., Путников Д.В., Гонгало В., Габуев К., Система для аналізу якісних характеристик зернових сумішей в режимі реального часу. // Харчова наука і технологія. – Одеса, 2018. –Volume 12. –Issue 4. -С. 128-134 **Особистий внесок здобувача:** Розроблено в співавторстві пристрій. Підготовлена стаття до друку.
5. Голубков П.С., Єгоров В.Б., Путников Д.В., Використання активих технологій при конвертації системи автоматичного регулювання нагріванням пельменної продукції з середовища математичного моделювання matlab simulink у середу розробки додатків labview // Автоматизация технологических и бизнес – процесів. – Одеса, 2019. –Volume 11. – Issue 3. -С. 80-83. **Особистий внесок здобувача:** Проведені експериментальні дослідження та їх аналіз. Розроблено програмне забезпечення та математичну модель. Підготовлена стаття до друку.
6. Голубков П., Єгоров В., Путников Д., Комп'ютерний зір у вирішенні проблеми розпізнавання форми кубічного пельменя. // Автоматизация технологических и бизнес –

- процесів. – Одеса, 2019. –Volume 10. –Issue 4. –С. 4-10 **Особистий внесок здобувача:** *Розроблено програмне забезпечення. Підготовлена стаття до друку.*
7. Голубков П.С., Бурдо О.Г., Войтенко О.К., Моделювання термомеханічних процесів виготовлення пельменів спеціальної форми. // Наукові праці. – Одеса, 2020. – Volume 54. –Issue 1. –С. 4-10 **Особистий внесок здобувача:** *Проведені експериментальні дослідження та їх аналіз. Розроблено математичну модель. Підготовлена стаття до друку.*
8. Голубков П.С., Єгоров В.Б., Новый формат научно - исследовательской лаборатории в высшем учебном заведении // Автоматизация технологических і бізнес – процесів. –Одеса, 2015. –Volume 7. –Issue 1. –С. 4-7 **Особистий внесок здобувача:** *Проведено літературний пошук та системний аналіз. Підготовлена стаття до друку.*
9. Голубков П.С., Розробка роботизованого комплексу виробництва пельменної продукції особливих форм // 78 Наукова конференція викладачів академії «Наукова постерна сесія» –Одесса, 2018. **Особистий внесок здобувача:** *Проведені експериментальні дослідження та приведено їх аналіз.*
10. Голубков П.С., Єгоров В.Б., Конкурс на лучшую разработку промышленного робототехнического комплекса на базе НИЛ «мехатроники и робототехники» и компании «SAMOZZI» // Международная научно-практическая конференция «Пищевые технологии, хлебопродукты и комбикорма». –Одесса, 2015. –С.8 **Особистий внесок здобувача:** *Проведено літературний пошук та системний аналіз. Розроблено обладнання. Підготовлена стаття до друку.*
11. Голубков П.С., Єгоров В.Б., Integration of the industrial robotics in the food industry // Мат. Міжнародної наукової конференції «Съюз на учените - Русе». – Русенский университет «Ангела Кынчева», -г.Русе, Болгария, 2015. **Особистий внесок здобувача:** *Проведено літературний пошук та системний аналіз. Підготовлена стаття до друку.*
12. Голубков П.С., Єгоров В.Б., Конкурс на лучшую разработку промышленного робота: от старта к итогам // XIII Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии и автоматизация» –Одесса, 2015. –С.8 **Особистий внесок здобувача:** *Проведено літературний пошук та системний аналіз. Розроблено обладнання. Підготовлена стаття до друку.*
13. Єгоров В.Б., Шипко А.І., Дронов Ю.А. Модернизация лабораторного стенда по промышленной электропневматике на основе роботов МП - 9 и оборудования компании Samozzi // Международная научно-практическая конференция «Пищевые технологии, хлебопродукты и комбикорма». –Одесса, 2016. –С.9 **Особистий внесок здобувача:** *Зроблено модернізацію обладнання. Підготовлена стаття до друку.*
14. Голубков П.С., Єгоров В.Б., Шипко А.І., Дронов Ю.А, Модернизация пневматического манипулятора МП-9 реализация процесса перемещения продукции. // XIII Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии и автоматизация» –Одесса, 2015. –С.26-27 **Особистий внесок здобувача:** *Зроблено модернізацію обладнання. Підготовлена стаття до друку.*
15. Голубков П.С., Єгоров В.Б., Путников Д.В., Эволюция человекоподобных роботизированных систем: взгляд из прошлого в будущее // Автоматизация технологических і бізнес – процесів. –Одеса, 2018. –Volume 10. –Issue 3. –С. 63-67 **Особистий внесок здобувача:** *Проведено літературний пошук. Підготовлена стаття до друку.*
16. Голубков П.С., Єгоров В.Б., Слуцкий Д.В., Проект SAMOZZI перемещение при помощи 2-ух пневмоцилиндров // XIII Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии и автоматизация» –Одесса, 2015. –С.47 **Особистий внесок здобувача:** *Розроблено обладнання. Підготовлена стаття до друку.*
17. Голубков П.С., Энергоэффективный робототехнический комплекс производства пельменной продукции. // научно-практична конференція Енергія. Бізнес. Комфорт. –

Одеса, 2019. –С. 58-59 **Особистий внесок здобувача:** *Розроблено обладнання. Проведено системний аналіз. Підготовлена стаття до друку.*

18. П. Голубков, О. Бурдо, І. Безбах, С. Шішов, А. Гаврілов, С. Терзев, Т. Недобітчук Development of a conceptual model of a robotic for the production of ravioli of special forms // Eureka: Life Sciences. –Tallin, 2020. – Volume 30. –Issue 6. **Особистий внесок здобувача:** *Розроблено обладнання. Підготовлена стаття до друку.*

АНОТАЦІЯ

ГОЛУБКОВ П.С. Розробка роботизованого комплексу для виробництва пельменів спеціальних форм - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 - процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв - Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2021.

Дисертацію присвячено розробці системи автоматичного керування процесом виробництва пельменів спеціальних форм.

Як відомо, у всякому виробництві існує безперервність, що перетворює його в відтворенні. При цьому відбувається поділ на споживану і нагромаджену частини, на відшкодування витрачених засобів виробництва. Перерахуємо фактори, в слідстві зміни яких, буде досягнута економія фінансових витрат. 1 - в даний час на виробничих лініях виробництва напівфабрикатів і пельменної продукції основне завдання по контролю готової продукції виконується з високим відсотком людського фактора. 2 - технологічний процес виробництва складається з розморожування фаршу перед ліпленням, а після отримання продукту повторного його заморожування, що тягне за собою додаткові фінансові витрати. 3 - поточна форма напівфабрикатів пельменної продукції є традиційною. Вкажемо на два фактори, які з метою ефективності системи можна змінити. Перший фактор несе в собі зміну форми продукції в бік ускладнення, як фактора, що виключає підробку. Другий фактор несе в собі завдання поліпшення складського зберігання, більш компактної продукції і транспортування. Об'єднавши перераховані вище фактори, ми можемо створити нову пельменну продукцію особливої форми. І лінію по виробництву продукції, що не вимагає вторинного розморожування інгредієнтів, а також скоротити людський фактор. Встановивши на лінію контролю систему розпізнавання готової продукції, яка не тільки сортує продукцію на браковану і нормальну, а також визначає і аналізує дефект браку і керує самим виробництвом. Оптимальною і складно реалізованою формою пельменної продукції буде пельмень строгої кубічної форми. Така форма в достатній мірі:

1 - буде являтися захистом від підробки товару виробника. 2 – дозволить сировину (м'ясо), що надходить обробляти (зробити фарш), і зберігати в замороженому вигляді інгредієнти (фаршеві кубики). 3 - дасть можливість працювати з сировиною, не піддаючи її повному розморожуванню і

подальшому повторному заморожуванню. 4 - отримання продукції із заданою формою, так само несе в собі скорочення енергетичних витрат при складуванні і транспортуванні продукції. 5 - мінімізувати людський фактор при виробництві продукції.

В цілому, для отримання готових виробів напівфабрикатів може забезпечуватися за рахунок досить простих САК, що реалізують тільки функції регулювання, тобто стабілізації режимних змінних процесу на їх заданих значеннях. Ці функції регулювання реалізуються на основі найпростіших типових алгоритмів, як правило, ПІД – алгоритмів регулювання. Таке можливо тільки завдяки тому, що рецептура готових напівфабрикатів і характеристики сировини та інгредієнтів не змінюються. Це обумовлює дві найважливіших для управління процесом обставини. 1 - це незмінність знайдених на етапі спеціальних досліджень оптимальних режимів виробництва продукції. У слідстві чого відсутня необхідність в ході процесу реалізовувати такі функції керування, як оптимізацію і адаптацію. 2 - відсутність збурень по сировині, тобто відсутність режимних змінних процесу, наслідки яких необхідно компенсувати САК при реалізації функції регулювання. Обурення, які зберігаються, пов'язані з коливаннями температури навколишнього середовища і швидкістю роботи пневматики, згідно із заданими алгоритмами. Інтенсивності цих збурень є досить низькими, і завдання по їх стабілізації є досить простим.

Ключові слова: харчова промисловість, напівфабрикати, пельмені, виробництво, робототехніка, яке гарантуватиме управління, САК.

SUMMARY

Golubkov P.S. Development of a robotic complex for the production of special forms of dumplings - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for a Candidate of Science Degree in Specialty 05.18.12 - processes and equipment of food, microbiological and pharmaceutical industries - Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2021.

The dissertation is devoted to the development of a system of automatic control of the process of production of dumplings of special forms.

As it is known, in every production there is continuity, which turns it into reproduction. Wherein, there is a division into consumed and accumulated parts, for compensation of the expended means of production.

Let's list the factors, savings in financial expenses can be achieved by changing them. 1 – currently, for the production of manufacture goods and ravioli the main task that is controlling finished products, with a high percentage of the human factor; 2 - the technological process of production consists of defrosting minced meat before modeling, and re-freezing it after receiving the product, that entails additional financial costs. 3 - current form of ravioli manufactures is traditional. Let's point out two factors those can be changed to perform effectiveness of the system. The first factor is changing form of the product in the direction of complication excluding counterfeiting. The second factor is improving

warehousing, performing density and transportation. Combining the above factors, we can create a new ravioli of a special form. And the technological process for the products production in which the secondary defrosting of ingredients is not required. The optimal and difficult to implement form of ravioli is cubic form. This form: 1 - will be a protection against a fake product manufacturer. 2 - allows incoming raw materials (meat) to process (produce minced meat), and to store frozen ingredients (minced cubes). 3 - will give the opportunity to work with raw materials, without subjecting them to full defrosting and further re-freezing. 4 - receiving products with a given shape, also carries a reduction in energy costs during storage and transportation of products. 5 - minimize human factors in production. In general, to obtain finished products of manufactures, it can be provided by fairly simple ACSs that implement only the regulation functions, i.e. stabilization of process variables of the process at their given values. These control functions are implemented on the basis of the simplest typical algorithms, as a rule, PID control algorithms. This is only possible due to the fact that the recipe of finished semi-finished products and the characteristics of raw materials and ingredients are not changed. This causes the two most important circumstances for managing the process. 1 – unchanging of found at the stage of special studies of the optimal modes of production. As a result, there is no need to implement control functions during the process such as optimization and adaptation. 2 – the lack of disturbances in raw materials, i.e. the lack of operational process variables, the consequences of which are necessary to be compensated by ACS when implementing the regulation function. Disturbances those persist are associated with fluctuations in ambient of pneumatic operation, according to specified algorithms. The intensities of these disturbances are rather low, and the task of stabilizing them is fairly simple.

However, when working with raw materials and ingredients of plant and animal origin (biopolymers), in particular minced meat and dough, the situation is completely different. It is characterized by the following factors: 1 - the recipe of products and their composition change due to the presentation of increasingly high requirements to products: increased nutritional value, cost reduction, expansion of the resource base, enrichment with vitamins and additives. 2 - the characteristics of the original product, even within the same recipe, always differ from each other (the composition of the dough and the composition of minced meat) and, therefore, during the process they can change significantly. Thus, in comparison with other technological processes of producing manufactures, the ravioli production has fundamental features that must be taken into account when developing automatic control systems claiming energy efficiency.

Key words: food industry, semi manufactures, ravioli, production, robotics, guarantee function, SAC.

Підписано до друку 15.03.2021. Формат 60×901 /16.
Папір. офс. Гарнітура “Таймс”. Друк. офс. Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9.
Наклад 100 прим. Зам. 79