

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ГРИЦЕВІЧ МАРІЯ ЮРІЇВНА**

УДК 664.681.9

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ НИЗЬКОБІЛКОВОГО ПЕЧИВА**

Спеціальність 181 Харчові технології

Галузь знань 18 – Виробництво та технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

М.Ю. Грицевіч М.Ю. Грицевіч

Науковий керівник: Дорохович Вікторія Віталіївна

Доктор технічних наук, доцент



Київ – 2023

## АНОТАЦІЯ

Грицевіч М.Ю. «Удосконалення технології низькобілкового печива» - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 181 «Харчові технології» - Національний університет харчових технологій, Міністерство освіти і науки України, Київ 2023.

Дисертаційна робота присвячена удосконаленню технології низькобілкового печива яке змогли б споживати хворі на фенілкетонурію.

У цій науковій роботі розглянута проблематика фенілкетонурії, включаючи її розповсюдження, симптоматику та методи лікування, особливо дієтотерапію. Дієтотерапія визнана найефективнішим методом лікування, і робота містить рекомендації щодо низькобілкової дієти та добової норми споживання фенілаланіну для пацієнтів. Окремий аспект присвячено аналізу ринку низькобілкових продуктів для людей із фенілкетонурією та дослідженню складу традиційного печива з акцентом на зменшення вмісту фенілаланіну.

Літературний огляд вказує на відсутність докладних публікацій щодо рецептур низькобілкового печива та його властивостей. Вибрано компоненти для подальших досліджень технології низькобілкового печива, зокрема гідроколоїди та крохмалі. Розроблено блок-схему досліджень для вдосконалення технологій виробництва.

Розроблено ряд рецептур низькобілкового печива та розраховано модель ідеального продукту для дітей різного віку хворих на фенілкетонурію.

Дослідження реологічних властивостей низькобілкових емульсій показало, що кривим в'язкості характерна поведінка зсувного потоншення, що є характерним для псевдопластичних рідин. Наявність камеді ксантану збільшує в'язкість емульсій, а заміна вершкового масла кукурудзяною олією

призвела до зниження в'язкості. Емульсії з вищою в'язкістю потребують потужнішого обладнання.

Бульбашки диспергованої фази емульсії без структуроутворювачів характеризуються неоднорідністю за розміром, рекомендується збільшити швидкість збивання для отримання більш однорідної консистенції.

В ході дослідження реологічних властивостей тіста з'ясовано, що модулі в'язкості низькобілкового тіста нижчі порівняно з традиційним здобним тістом, криві модулів пружності і в'язкості не пересікаються, що свідчить про відсутність текучості тіста. Всі зразки низькобілкового тіста рекомендовано формувати виїмним методом. Комплексні в'язкості низькобілкових виробів в одному діапазоні з тістом для традиційного печива, що підтверджує можливість виробництва на існуючому обладнанні.

Аналіз альвеографічних досліджень підтверджує відсутність еластичності у низькобілковому тісті, а додавання тапіокового крохмалю збільшує розтяжність, що полегшує формування тіста.

Зразки низькобілкового та традиційного тіста мають виражені пластичні властивості. Додавання мальтодекстрину та тапіокового крохмалю підвищує пружність тіста. Зразки низькобілкового тіста та тіста для виробництва традиційного здобного печива деформуються під дією сили і не повністю відновлюють свою форму. Коефіцієнти відновлення зворотної деформації для низькобілкового тіста знаходяться в діапазоні від 0,385 до 0,525, а для тіста для традиційного здобного печива - 0,490.

Тісто для низькобілкового печива має аналогічні реологічні властивості до тіста для традиційного печива, що підтверджує можливість виробництва низькобілкового печива на існуючому обладнанні.

В результаті термічного аналізу проведеного шляхом термогравіметрії та диференціальної скануючої калориметрії визначено температуру втрати низькобілковими зразками всієї розрахункової вологи, та доведено термічний розклад досліджуваних зразків при подальшому нагріванні.

Встановлено, що раціональна тривалість випікання-сушіння низькобілкового печива становить на 40% більше порівняно з традиційним здобним печивом. Визначено, що для термічної обробки традиційного здобного печива необхідна менша кількість енергії ніж для термічної обробки низькобілкового печива. ( $\Delta H=124,05$  Дж/г та  $\Delta H=199,46 - 268,33$  Дж/г відповідно). Додавання мальтодекстрину до рецептур низькобілкового тіста не суттєво зменшує кількість енергії необхідної для термічної обробки печива, в той час як заміна 20% кукурудзяного крохмалю на тапіоковий знижує кількість енергії необхідної на термообробки печива на 25,7%.

Визначено, що органолептичні характеристики низькобілкового печива відповідають вимогам діючої нормативної документації, а термічна обробка впливає на геометричні розміри виробів, вимагаючи налаштування обладнання для формування. Фізико-хімічні показники розроблених низькобілкових виробів відповідають діючій нормативної документації, а вміст фенілаланіну робить їх безпечними для споживання пацієнтами з фенілкетонурією.

Низькобілкове печиво проявляє полімолекулярну адсорбцію зі змінами вологоутримування, впливаючи на його термін зберігання. Рівноважна вологість при відносній вологості повітря 75% розробленого низькобілкового печива становить 11,5 ... 12,7%. Розроблені вироби рекомендовано упаковувати герметично для запобігання впливу навколишнього середовища.

Три рецептури низькобілкового печива були представлені до дегустації та затверджені СГДК.

Ключові слова: кондитерські вироби, печиво, рецептура, реологічні властивості, емульсії, мікроструктура, тісто, крохмалі, структурно-механічні властивості, вологість, зберігання, фенілкетонурія, низькобілкові вироби

## СПИСОК НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

### Статті

1. Дорохович, В.В., Грицевіч, М.Ю., Богатирьова, Є.В., & Антонік, А.В. (2019). Низькобілкове печиво: розробки та перспективи. *Хлібний і кондитерський бізнес*, 4, 26-27. (Спеціалізоване інформаційно-аналітичне видання)
2. Dorokhovych, V., Hrytsevich, M., & Loza, I. (2020). Problems of confectionery products development for patients with phenylketonuria. *Scientific Works of National University of Food Technologies*, 26(2), 187-194. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2020-26-2-19> (Науковий журнал, входить до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук; індексація: *Index Copernicus*, *Google Scholar*)
3. Dorokhovych, V., & Hrytsevich, M. (2022). The use of corn and tapioca starch in the production of low-protein cookies for patients with phenylketonuria. *Scientific Works of National University of Food Technologies*, 28(3), 144-153. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2022-28-3-14> (Науковий журнал, входить до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук; індексація: *Index Copernicus*, *Google Scholar*)
4. Hrytsevich, M., Dorokhovych, V. (2023). Influence of the dough composition on the heat treatment of low-protein cookies. *Ukrainian Journal Food Science*, 11(1), 29-41. <https://doi.org/10.24263/2310-1008-2023-11-1-6> (Науковий журнал, входить до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з технічних наук; індексація: *Index Copernicus*, *Google Scholar*)
5. Грицевіч, М.Ю., Дорохович, В.В. (2023). Дослідження впливу крохмальної сировини на сорбційно-десорбційні властивості низькобілкового печива. *Харчова промисловість*, 33(1), 18-27. (Науковий журнал, входить до затвердженого МОН Переліку наукових фахових

видань України з технічних наук; індексація: *Index Copernicus, Google Scholar*)

6. Грицевіч, М., & Дорохович, В. (2023). Дослідження реологічних властивостей та мікроструктури емульсій для приготування низькобілкового тіста. *Věda a perspektivy*, 9(28), 386–397. [https://doi.org/10.52058/2695-1592-2023-9\(28\)-386-397](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2023-9(28)-386-397) (*Міжнародний науковий журнал, Чеська Республіка, індексація: Index Copernicus, Google Scholar*)

7. Грицевіч, М., & Дорохович, В. (2023). Розробка рецептур низькобілкового печива для хворих на фенілкетонурію. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 2(5), 31–39. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230205.04> (*Міжнародний науковий журнал, Польща, індексація: Index Copernicus, Google Scholar*)

### **Матеріали конференцій**

1. Дорохович, В.В., Грицевіч, М.Ю. (2018) Інноваційна технологія низькобілкового печива для хворих на фенілкетонурію. «Здобутки та перспективи розвитку кондитерської галузі»: *Міжнародна науково-практична конференція*. 13 вересня 2018 р., Київ, НУХТ, С. 94-96.

2. Грицевіч, М.Ю., Богатирьова, Є.В., Антонік, А.В., Дорохович, В.В. (2019) Вплив структуроутворювачів камеді гуару та карбоксиметилцеллюлози на кількість вільної і зв'язаної вологи в тістових масах для низькобілкового печива. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Матеріали 85 Ювілейної Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів*. 11-12 квітня 2019 р., Київ, НУХТ, С. 204.

3. Дорохович, В.В., Грицевіч, М.Ю., Богатирьова, Є.В. (2019) Перспективи розроблення безбілкового печива. «Здобутки та перспективи розвитку кондитерської галузі»: *Міжнародна науково-практична конференція*. 10-11 вересня 2019 р., Київ, НУХТ, С. 96-98.

4. Дорохович, В.В., Богатирьова, Є.В., Грицевіч, М.Ю. (2019) Особливості розроблення низькобілкових «борошняних» кондитерських виробів. *Perspectives of world science and education. Abstracts of the 2nd International scientific and practical conference.* 30-31 of October 2019, Osaka, Japan. 2019. Pp. 482-487.

5. Дорохович, В.В., Грицевіч, М.Ю., Лоза І.П. (2019) Проблематика розроблення низькобілкових «борошняних» кондитерських виробів для хворих на фенілкетонурію *Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті євроінтеграції: VIII Міжнародна науково-практична конференція.* 5-6 листопада 2019 р. Київ, НУХТ, С. 144=145

6. Дорохович, В.В., Грицевіч, М.Ю., Богатирьова, Є.В. (2019) Розроблення низькобілкових «борошняних» кондитерських виробів – актуальне завдання. *Інноваційний розвиток харчової індустрії: VII Міжнародна науково практична конференція.* 21 листопада 2019 р., Інститут продовольчих ресурсів НААН. С. 37-38.

7. Богатирьова, Є.В., Дорохович, В.В., Грицевіч, М.Ю. (2020) Розроблення низькобілкового печива з застосуванням кукурудзяного крохмалю та структуроутворювачів. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Матеріали 86 Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів.* 2-3 квітня 2020 р., Київ, НУХТ, С. 120.

8. Dorokhovych V., Hrytsevich M., Bohatyrova Ye (2020) Low protein cookies designing for patients with phenylketonuria based on corn starch. 5th International scientific and practical conference: Eurasian Scientific Congress. 17-19 May 2020, Barcelona, Spain, С. 15-17.

9. Дорохович, В.В., Грицевіч, М.Ю. (2020) Технологічні виклики при розробці низькобілкових «борошняних» кондитерських виробів для хворих на фенілкетонурію. *Технології харчових продуктів і комбікормів: Збірник*

тех доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, 22.25 вересня 2020 р., Одеса, Україна: ОНАХТ, С. 37.

10. Дорохович, В.В., Грицевіч, М.Ю. (2020) Дослідження впливу кукурудзяного та тапіокового крохмалю на органолептичні показники низькобілкового печива. *Здобутки та перспективи розвитку кондитерської галузі: Міжнародна науково-практична конференція*. 24 листопада 2020 р., Київ, НУХТ, С. 106-107.

11. Dorokhovych, V., Hrytsevich, M., (2021) Effect of the use of corn, tapioca starches and maltodextrine on water absorption of low-protein cookies for patients with phenylketonuria. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Матеріали 87 Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів*. 15-16 квітня 2021 р., Київ, НУХТ, С. 144.

12. Грицевіч, М.Ю., Дорохович, В.В., Думплер, Й. (2023) Вплив камеді ксантану на процес термооброблення низькобілкового печива. Проблеми і практичні підходи виробництва та регулювання використання харчових добавок в країнах Європейського Союзу та в Україні: Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції. 24-24 жовтня 2023 р., Київ: НУХТ, С. 14.

13. Грицевіч, М.Ю., Дорохович, В.В. (2023) Особливості технології низькобілкового печива. *інноваційні технології розвитку харчових виробництв та ресторанної індустрії: наукові пошуки молоді: Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених*. 26 жовтня 2023 р., Харків, ДБТУ, С. 16.

## ABSTRACT

Hrytsevich M. “ Improving the technology of low-protein cookies” - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the speciality 181 "Food Technologies" - National University of Food Technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv 2023.

The dissertation is devoted to the improvement of low-protein cookies technology that could be consumed by patients with phenylketonuria.

The thesis discusses the issue of phenylketonuria, including its prevalence, symptoms and treatment methods, especially dietary therapy. Dietary therapy is recognised as the most effective treatment, and the scientific work provides recommendations on a low-protein diet and daily intake of phenylalanine for patients. A separate aspect is devoted to the analysis of the market for low-protein foods for people with phenylketonuria and the study of the composition of traditional biscuits with a focus on reducing the phenylalanine content.

The literature review indicates that there are no detailed publications on low-protein cookies formulations and their properties. The components for further research of low-protein cookies technology, in particular hydrocolloids and starches, were selected. A research flowchart for improving production technologies was developed.

A number of low-protein cookies recipes have been developed and a model of an ideal product for children of different ages with phenylketonuria has been calculated.

The study of the rheological properties of low-protein emulsions showed that the viscosity curves exhibit shear thinning behaviour, which is typical of pseudoplastic liquids. The presence of xanthan gum increases the viscosity of the emulsions, and the replacement of butter with corn oil led to a decrease in viscosity. Emulsions with higher viscosities require more powerful equipment.

The bubbles of the dispersed phase of the emulsion without structuring agents are characterised by heterogeneity in size, it is recommended to increase the whipping speed to obtain a more uniform consistency.

The study of the rheological properties of the dough revealed that the viscosity moduli of low-protein dough are lower than those of traditional butter dough, and the elasticity and viscosity curves do not intersect, indicating that the dough does not flow. All low-protein dough samples are recommended to be moulded using the notching method. The complex viscosities of low-protein products are in the same range as the dough for traditional cookies, which confirms the possibility of production using existing equipment.

The analysis of alveographic studies confirms the absence of elasticity in low-protein dough, and the addition of tapioca starch increases the extensibility, which facilitates dough moulding.

The samples of low-protein and traditional dough have pronounced plastic properties. The addition of maltodextrin and tapioca starch increases the elasticity of the dough. Samples of low-protein dough and dough for the production of traditional butter biscuits are deformed under force and do not fully restore their shape. The recovery coefficients for low-protein dough are in the range of 0.385 to 0.525, and for traditional butter biscuit dough - 0.490.

The dough for low-protein cookies has similar rheological properties to the dough for traditional cookies, which confirms the possibility of producing low-protein cookies using existing equipment.

As a result of the thermal analysis carried out by thermogravimetry and differential scanning calorimetry, the temperature of loss of all calculated moisture of low-protein samples was determined, and the thermal decomposition of the studied samples during further heating was proved.

It has been established that the rational duration of baking and drying of low-protein cookies is 40% longer than that of traditional butter cookies. It was determined that less energy is required for the heat treatment of traditional butter

cookies than for the heat treatment of low-protein cookies ( $\Delta H=124.05$  J/g and  $\Delta H=199.46-268.33$  J/g, respectively). The addition of maltodextrin to low-protein dough formulations does not significantly reduce the amount of energy required for cookies heat treatment, while the replacement of 20% corn starch with tapioca starch reduces the amount of energy required for cookies heat treatment by 25.7%.

It has been determined that the sensory characteristics of low-protein cookies meet the requirements of current regulatory documents, and heat treatment affects the geometric dimensions of products, requiring adjustment of moulding equipment. The physicochemical characteristics of the developed low-protein products comply with the current regulatory documents, and the phenylalanine content makes them safe for consumption by patients with phenylketonuria.

Low-protein cookies exhibit polymolecular adsorption with changes in moisture retention, affecting their shelf life. The equilibrium moisture content at 75% relative humidity of the developed low-protein biscuits is 11.5...12.7%. It is recommended to pack the developed products hermetically to prevent environmental exposure.

Keywords: confectionery, biscuits, low-protein products, recipe, rheological properties, emulsions, microstructure, dough, starches, structural and mechanical properties, humidity, storage, phenylketonuria.

## ЗМІСТ

|  |           |
|--|-----------|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....   | 15        |
| ВСТУП.....   | 16        |
| <b>РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ УДОСКОНАЛЕННЯ<br/>ТЕХНОЛОГІЇ НИЗЬКОБІЛКОВОГО ПЕЧИВА.....</b>                                   | <b>23</b> |
| 1.1 Фенілкетонурія та дієтотерапія при фенілкетонурії.....   | 23        |
| 1.2 Існуючі розробки кондитерських виробів для хворих на<br>Фенілкетонурію.....  | 33        |
| 1.3 Обґрунтування виробу основних рецептурних компонентів та<br>структуруювачів.....   | 39        |
| Висновки до розділу 1.....   | 46        |
| <b>РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТІВ, ПРЕДМЕТІВ, МЕТОДІВ<br/>ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ<br/>ЕКСПЕРИМЕНТІВ.....</b> | <b>48</b> |
| 2.1 Характеристика об'єктів та предметів досліджень.....   | 48        |
| 2.2. Організація<br>експерименту.....  | 49        |
| 2.3 Методи досліджень.....   | 51        |
| 2.3.1 Методи дослідження сировини та напівфабрикатів.....  | 51        |
| 2.3.2 Методи дослідження процесу термооброблення.....  | 56        |
| 2.3.3 Методи дослідження готових виробів.....  | 58        |
| Висновки до розділу 2.....   | 58        |
| <b>РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ РЕЦЕПТУРНОГО СКЛАДУ<br/>НИЗЬКОБІЛКОВОГО ПЕЧИВА.....</b>  | <b>59</b> |
| 3.1 Особливості розроблення рецептур низькобілкового печива.....   | 59        |
| 3.2 Розроблення низькобілкового печива з застосуванням пшеничного<br>борошна в обмеженій кількості.....                          | 61        |
| 3.3 Розроблення низькобілкового печива без застосування пшеничного<br>борошна.....   | 64        |

|   |            |
|---|------------|
| 3.4 Удосконалення рецептурного складу низькобілкового печива шляхом застосування тапіокового крохмалю.....  | 67         |
| 3.5 Удосконалення рецептурного складу низькобілкового печива на основі розрахунку моделі ідеального продукту.....   | 69         |
| Висновки до розділу 3.....  | 72         |
| <b>РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ТІСТОПРИГОТУВАННЯ НИЗЬКОБІЛКОВОГО ПЕЧИВА.....</b>  | <b>74</b>  |
| 4.1. Особливості технології приготування печива.....  | 74         |
| 4.2. Дослідження емульсій для приготування низькобілкового печива.....  | 76         |
| 4.3 Дослідження реологічних властивостей тіста. ....  | 85         |
| 4.3.1. Малоамплітудне осциляційне зсувне дослідження низькобілкових тістових систем.....  | 87         |
| 4.3.2 Дослідження реологічних властивостей низькобілкових тістових мас за допомогою альвеограм.....   | 92         |
| 4.3.3 Дослідження деформації повзучості та відновлення низькобілкових тістових мас.....   | 94         |
| Висновки до розділу 4.....  | 99         |
| <b>РОЗДІЛ 5 – УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕРМООБРОБЛЕННЯ НИЗЬКОБІЛКОВОГО ПЕЧИВА.....</b>   | <b>102</b> |
| 5.1 Оптимізація параметрів термооброблення низькобілкового печива та зміна розмірів тістових заготовок під час термооброблення за оптимальних параметрів..... | 101        |
| 5.2 Термічний аналіз низькобілкових тістових мас.....   | 106        |
| 5.2.1 Термогравіметричний аналіз низькобілкових тістових мас.....   | 107        |
| 5.2.2 Диференціальний термічний аналіз низькобілкових тістових мас.....   | 111        |
| 5.3.3 Диференційна сканувальна калориметрія низькобілкових тістових мас.....  | 113        |
| Висновки до розділу 5.....  | 117        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>РОЗДІЛ 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ РОЗРОБЛЕНОГО</b>  |            |
| <b>НИЗЬКОБІЛКОВОГО ПЕЧИВА.....</b>  | <b>119</b> |
| 6.1 Органолептичні, фізико-хімічні, структурні показники розробленого<br>низькобілкового печива.....            | 119        |
| 6.2 Дослідження впливу крохмальної сировини на сорбційно-десорбційні<br>властивості низькобілкового печива..... | 128        |
| 6.3 Особливості технології низькобілкового печива, розрахунок<br>енергетичної цінності та відпускної ціни.....  | 136        |
| Висновки до розділу 6.....  | 139        |
| <b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>   | <b>141</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>  | <b>147</b> |
| <b>ДОДАТКИ.....</b>   | <b>166</b> |

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ**

ФКУ – фенілкетонурия

ФА – фенілаланін

ТЗ – тістові заготовки

ВООЗ – Всесвітня організація охорони здоров'я

PAL – ген фенілаланін гідроксилази

ВН4 – тетрагідробіоптерину

PEG – пегваліази

FDA – Управління з контролю за продуктами і ліками

EMA – Європейське агентство з лікарських засобів

LNAА – добавки великих нейтральних амінокислот

CAS – реєстраційний номер хімічних сполук Хімічної реферативної служби Американського хімічного товариства

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Певні групи населення потребують пожиттєвого дотримання низькобілкової дієти, зокрема хворі на фенілкетонурію потребують дотримання дієти з низьким вмістом фенілаланіну (до 600 мг фенілаланіну на 100г готових виробів). На день оприлюднення роботи в Україні відсутні підприємства, що виготовляють низькобілкові борошняні кондитерські вироби, що суттєво ускладнює підтримання низькобілкової дієти.

У технології низькобілкового печива варто відмовитись від сировини, що містить у своєму складі відносно велику кількість білку і фенілаланіну: борошна, яйцепродуктів, молочних продуктів. Оскільки саме ці рецептурні інгредієнти відіграють ключову роль у формуванні структури напівфабрикатів і готових виробів, необхідно змоделювати властивості білків тіста за допомогою комбінації різних видів низькобілкової сировини, зокрема крохмалів і структуроутворювачів.

Процеси, що відбуваються у ході технологічного процесу виробництва низькобілкових виробів (приготування тіста, формування тістових заготовок та їх термооброблення) залишаються не вивченими і потребують додаткових досліджень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, темами і планами.** Наукова робота проводилась згідно з напрямом науково-дослідної роботи «Розроблення сучасних енерго- і ресурсощадних технологій та нанотехнологій для виробництва якісних і безпечних харчових продуктів» Національного університету харчових технологій та в рамках наукової тематики «Розробка інноваційних виробів спеціального, оздоровчого та дієтичного призначення» кафедри технології хлібопекарських і кондитерських виробів ННІХТ НУХТ (Державний реєстраційний номер 00117u003717).

**Мета і завдання роботи.** Метою роботи є удосконалення технології низькобілкового печива шляхом застосування поєднання крохмалів (картопляного, кукурудзяного та тапіокового) та гідроколоїдів (карбоксиметилцелюлози, камеді ксантану і гуару) з метою модуляції властивостей білків тіста.

Для досягнення мети було сформовано наступні завдання:

1. Провести теоретичні дослідження щодо проблематики захворювання на фенілкетонурію, методів лікування та дієтотерапії. Проаналізувати існуючий асортимент низькобілкових виробів для хворих на фенілкетонурію.

2. Провести теоретичні дослідження щодо сировини що використовується для виробництва традиційного здобного печива, вмісту білку і фенілаланіну в цій сировині. Підібрати рецептурні компоненти, що можуть бути використані у виробництві низькобілкового печива.

3. Розробити рецептури низькобілкового печива, з обмеженим вмістом білку і фенілаланіну. Розрахувати модель ідеального продукту для дітей хворих на фенілкетонурію віком 1 і 10 року, та удосконалити рецептурний склад низькобілкового печива на основі потреби у нутрієнтах.

4. Дослідити реологічні властивості напівфабрикатів низькобілкового печива, визначити вплив низькобілкових рецептурних компонентів на тістові маси та їх взаємодію між собою з метою моделювання властивостей традиційного тіста за допомогою комбінації різних видів крохмалю з гідроколоїдами. Визначити модулі пружності, модулі в'язкості, комплексну в'язкість, еластичність, розтяжність тіста, коефіцієнти відновлення зворотної деформації та піддатливість до деформації низькобілкових тістових мас, та порівняти отримані дані з реологічними показниками традиційного тіста для здобного печива. Дати рекомендації щодо удосконалення процесів приготування емульсій, тіста та формування тістових заготовок.

5. Оптимізувати процес термооброблення, дослідити зміни геометричних розмірів низькобілкових тістових заготовок в процесі термооброблення та провести термічний аналіз низькобілкових тістових мас: дослідити ендотермічні та екзотермічні процеси що відбуваються під час термічної обробки низькобілкового печива. Порівняти вплив різних рецептурних компонентів на кількість енергії необхідної на термооброблення низькобілкового печива.

6. Визначити органолептичні показники розробленого низькобілкового печива та встановити відповідність цього печива вимогам діючої нормативної документації. Дослідити сорбційно-десорбційні властивості низькобілкового печива, розрахувати енергетичну цінність та ціну за 1 кг розробленого низькобілкового печива.

*Об'єкт досліджень* – технологія низькобілкового печива.

*Предмет досліджень* – сировина для виготовлення низькобілкового печива, емульсія, тістова маса, тістові заготовки, готові вироби.

*Методи досліджень* – стандартні загальноприйняті, спеціальні реологічні методи, що виконувались з застосуванням сучасних приладів (Shimadzu TOC/ TNM-L, Mettler Toledo DSC 3+ реометрів Anton Paar 302 та Anton Anton Paar 702), методи математичного моделювання та статистичної обробки даних.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Науково обґрунтовано удосконалення технології низькобілкового печива шляхом раціонального використання крохмалів (кукурудзяний, картопляний, тапіоковий), гідроколоїдів (карбокисметилцелюлоза, камідь ксантану та гуару), мальтодекстрину з метою мінімізації вмісту фенілаланіну та сировини багатой на фізіологічно-функціональні інгредієнти з метою покращення нутрієнтного складу виробів, які могли б споживати хворі на фенілкетонурію.

### **Вперше:**

- досліджено та обґрунтовано реологічні властивості низькобілкових тістових мас та визначено вплив кукурудзяного та тапіокового крохмалів, мальтодекстрину та камеді ксантану на модулі пружності, модулі в'язкості, комплексну в'язкість, еластичність, розтяжність тіста, коефіцієнти відновлення зворотної деформації та піддатливість до деформації низькобілкових тістових мас з використанням сучасних методів дослідження (дослідження деформації повзучості та відновлення, альвеографічні дослідження, малоамплітудні осциляційні зсувні дослідження низькобілкових тістових систем);

- розраховано модель ідеального продукту для дітей хворих на фенілкетонурію віком 1 рік та 10 років, удосконалено рецептуру низькобілкового печива згідно з моделлю;

- проведено термічний аналіз низькобілкових тістових мас: термогравіметричний аналіз та диференційну сканувальну калориметрію, визначено що для термічної обробки низькобілкового печива потрібна більша кількість енергії ніж для традиційного ( $\Delta H=199,46 - 268,33$  Дж/г та  $\Delta H=124,05$  Дж/г відповідно);

- визначено та обґрунтовано вплив кукурудзяного, тапіокового крохмалів, мальтодекстрину та камеді ксантану на сорбційно-десорбційні властивості низькобілкового печива, який полягає у збільшенні сорбційного об'єму пор у виробках з тапіоковим крохмалем, збільшенні рівноважної вологості збільшується при використанні кукурудзяного крохмалю до 11,5%, при використанні мальтодекстрину – 12,4%, з внесенням мальтодекстрину та тапіокового крохмалю – 12,7%.

### **Дістало подальшого розвитку:**

- дослідження впливу камеді ксантану, вершкового масла, кукурудзяної олії та морквяного пюре на динамічну в'язкість,

мікроструктуру та розмір диспергованої фази емульсій для приготування печива.

**Практичне значення результатів** полягає у розробленні технології низькобілкового печива високої якості, напівфабрикати якого володіли би схожими реологічними і структурно-механічними властивостями до напівфабрикатів традиційного здобного печива виготовлено на основі пшеничного борошна. Розроблене печиво може бути виготовлене на існуючих технологічних лініях для приготування традиційного печива без додаткових інвестицій в нове обладнання.

Розроблено, представлено до дегустаційної комісії і затверджено рецептури та технологічні інструкції на нові найменування низькобілкового печива «Ванільна мрія», «Ванільна фантазія» та «Шоколадна фантазія».

**Особистий внесок здобувача.** Здобувачем проведено аналіз наукової літератури, розробка рецептур низькобілкового печива та ряд експериментальних досліджень для досягнення задач поставлених в роботі.

Постановка мети і завдань досліджень, аналіз отриманих результатів, обговорення та узагальнення проводилось спільно з науковим керівником Дорохович В.В.

Визначення вмісту фенілаланіну, диференціальна сканувальна калориметрія, дослідження реологічних властивостей та мікроструктур напівфабрикаті визначено здобувачем самостійно у лабораторіях «Інженерії харчових процесів» та «Сталого виробництва харчових продуктів Швейцарської вищої технічної школи Цюріха за підтримки професорів Віндхаба Е. та Матіса А.

Сорбційні властивості розробленого низькобілкового печива та термогравіметричні властивості тіста досліджено спільно зі співробітниками Інституту фізичної та колоїдної хімії ім. Писаржевського Л.В. НАН України. Альвеографічний аналіз профедено спільно з фахівцями

випробувальної лабораторії державного підприємства «Державний центр сертифікації і експертизи сільськогосподарської продукції».

**Апробація результатів роботи.** Результати і основні положення дисертаційної роботи було оприлюднено і обговорено на: Міжнародній науково-практичній конференції "Здобутки та перспективи розвитку кондитерської галузі" (Київ, 2018 р.), 85-ій Ювілейній Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів (Київ, 2019 р.), Міжнародній науково-практичній конференції "Здобутки та перспективи розвитку кондитерської галузі" (Київ, 2019 р.), Perspectives of World Science and Education (Осака, Японія, 2019 р.), VIII Міжнародній науково-практичній конференції "Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті євроінтеграції" (Київ, 2019 р.), VII Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційний розвиток харчової індустрії» (Київ, 2019 р.), 86-ій Міжнародній науковій конференції молодих учених, аспірантів (Київ, 2020 р.), 5-й Міжнародній науково-практичній конференції: Eurasian Scientific Congress (Барселона, Іспанія, 2020 р.), Міжнародній науково-практичній конференції "Технології харчових продуктів і комбікормів" (Одеса, 2020 р.), Міжнародній науково-практичній конференції "Здобутки та перспективи розвитку кондитерської галузі" (Київ, 2020 р.), 87-ій Міжнародній науковій конференції молодих учених, аспірантів (Київ, 2021 р.), 2-й Міжнародній науково-практичній конференції "Проблеми і практичні підходи виробництва та регулювання використання харчових добавок в країнах Європейського Союзу та в Україні" (Київ, 2023 р.), Міжнародній науково-практичній конференції "Інноваційні технології розвитку харчових виробництв та ресторанної індустрії: наукові пошуки молоді" (Харків, 2023 р.)

**Публікації результатів роботи.** За результатами роботи опубліковано 20 наукових праць. Серед них: 4 статті у наукових фахових виданнях України, 2 статті у міжнародних наукових журналах, 1 стаття у

спеціалізованому інформаційно-аналітичному виданні, 13 матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з: вступу, шести розділів, загальних висновків, використаних джерел інформації та додатків. Матеріали дисертації викладено на 148 сторінках основного друкованого тексту, робота містить 22 рисунки і 21 таблицю. Список використаних джерел включає 164 найменування.

## РОЗДІЛ 1

### ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ НИЗЬКОБІЛКОВОГО ПЕЧИВА

#### 1.1 Фенілкетонурія та дієтотерапія при фенілкетонурії

Існують різні захворювання що потребують спеціального харчування і дотримання дієти, одним з таких захворювань є фенілкетонурія.

Фенілкетонурія (ФКУ) - це аутосомно-рецесивний стан, спричинений дефіцитом фенілаланінгідроксилази, і є вродженою помилкою метаболізму. Фенілкетонурія відома як перша хвороба, для якої було запроваджено скринінг новонароджених, і ці зусилля призвели до того, що покоління дітей були позбавлені інтелектуальної недостатності. ФКУ традиційно лікується за допомогою дієти з низьким вмістом білка та медичних добавок. Ускладнення цього захворювання пов'язані з ураженням центральної нервової системи і розвитком психічних та неврологічних порушень:

- розумової відсталості (олігофренія, імбецильність);
- неврологічного дефіциту, який проявляється незворотними дистрофічними змінами (судоми).

У разі ранньої верифікації діагнозу та призначення дієти прогноз умовно сприятливий (повністю вилікувати захворювання не вдається, але можна попередити токсичний вплив фенілаланіну (ФА) та його похідних [87].

Історія ФКУ узагальнена в таблиці 1.

**Таблиця 1.1 – Історія дослідження захворювання на фенілкетонурію**

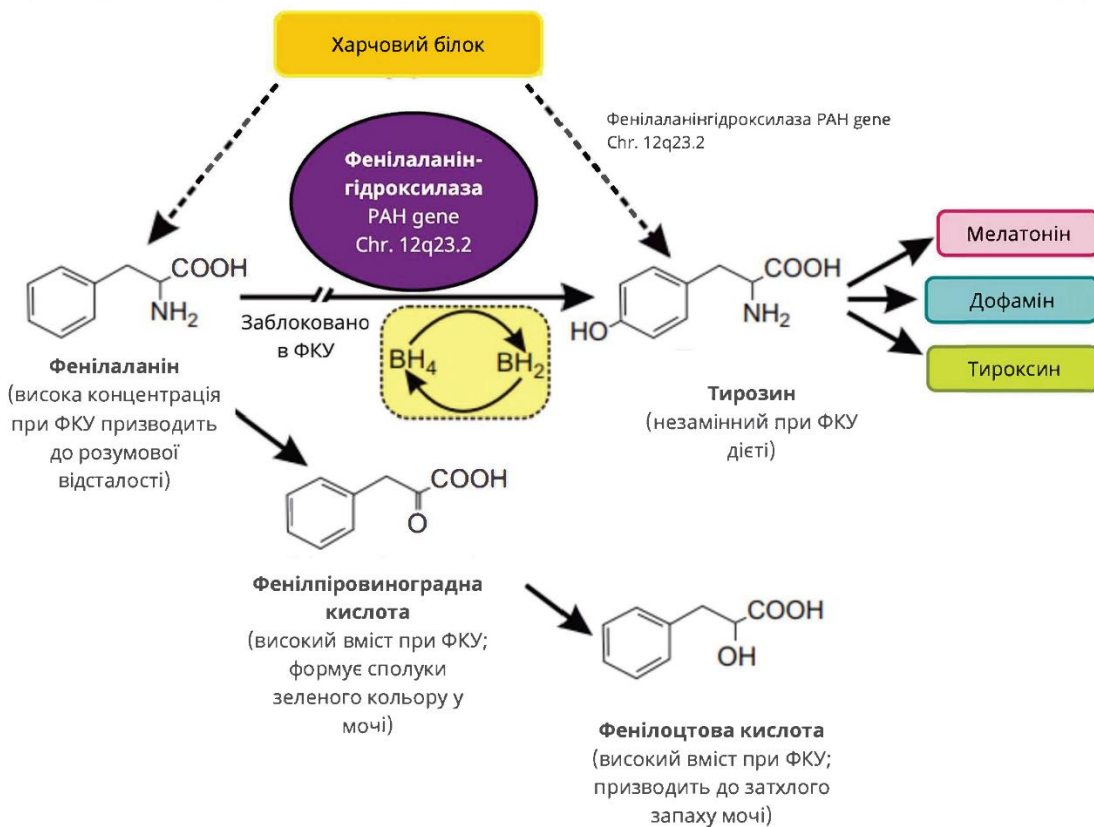
| Рік  | Історія   |
|------|---|
| 1934 | ФКУ вперше визнано. Її назвали «фенілпіровиноградною олігофренією», оскільки підвищений рівень фенілпіровиноградної кислоти був пов'язаний з розумовою недостатністю. |
| 1953 | Виявлено ферментну систему, яка перетворює фенілаланін на   |

|         |   |
|---------|---|
|         | тирозин   |
| 1953    | Вперше спробували дієту з низьким вмістом фенілаланіну  |
| 1960-ті | Аналіз мікробного інгібування використовували для масового скринінгу новонароджених на ФКУ  |
| 1980-ті | Ген фенілаланінгідроксилази людини (PAL) був картований і клонований, а також ідентифікована перша мутація  |
| 1980-ті | Встановлено, що рослинний фермент фенілаланінаміакліаза (PAL; EC 4.3.1.5) виживає в кишечнику достатньо довго, щоб розкласти харчовий фенілаланін у шлунково-кишковому тракті перед всмоктуванням |
| 1999    | Перші повідомлення про успішне використання тетрагідробіоптерину (BH4) для зниження концентрації фенілаланіну в крові у пацієнтів з легкою ФКУ  |
| 2014    | Перші повідомлення про дослідження фази 1 на людях із застосуванням пегваліази (PEG) та PAL щодо зниження концентрації фенілаланіну в крові у дорослих з ФКУ [58]                                 |
| 2018    | Управління з контролю за продуктами і ліками (FDA) схвалило використання пегваліази для лікування дорослих пацієнтів із ФКУ з Phe крові >600 мкмоль/л [87]  |
| 2019    | Європейське агентство з лікарських засобів (EMA) схвалило пегваліазу для лікування пацієнтів з ФКУ у віці $\geq 16$ років із FA крові >600 мкмоль/л [87]  |

Метаболізм фенілаланіну в організмі людини зображено на рисунку 1.1.

Дослідниками було встановлено, що у здорових людей амінокислота фенілаланін перетворюється на тирозин і широко транспортується по організму через кровотік. Тирозин є відправною точкою для синтезу пігменту шкіри меланіну, гормону щитовидної залози тироксину та

нейромедіаторних молекул норадреналіну та дофаміну (рис. 1.1). Проте у дітей із ФКУ фенілаланін не може бути перетворений у тирозин тому що відбувається повне блокування цього метаболічного етапу, і концентрація фенілаланіну піднімається до високих рівнів, що пошкоджує мозок [92]. У 1953 році була остаточно визначена біохімічна причина ФКУ: у клітинах печінки є фермент, який зазвичай перетворює фенілаланін з крові в тирозин, який, у свою чергу, виділяється назад у кров і циркулює до інших клітин організму. Науковці назвали цей фермент фенілаланінгідроксилазою, оскільки він додає одну гідроксильну групу (ОН) до молекули фенілаланіну, і робить її тирозином (рис. 1.1).



**Рис. 1.1 – Метаболізм фенілаланіну в організмі здорової людини, та хворої на фенілкетонурію [118].**

Активність ферменту в печінці людей з ФКУ була настільки низькою, що її неможливо було виявити [48]. Дослідники були впевнені, що унікальний фермент був закодований в гені, а мутантна форма гена була рецесивною. Потім ген назвали геном фенілаланін гідроксилази [118].

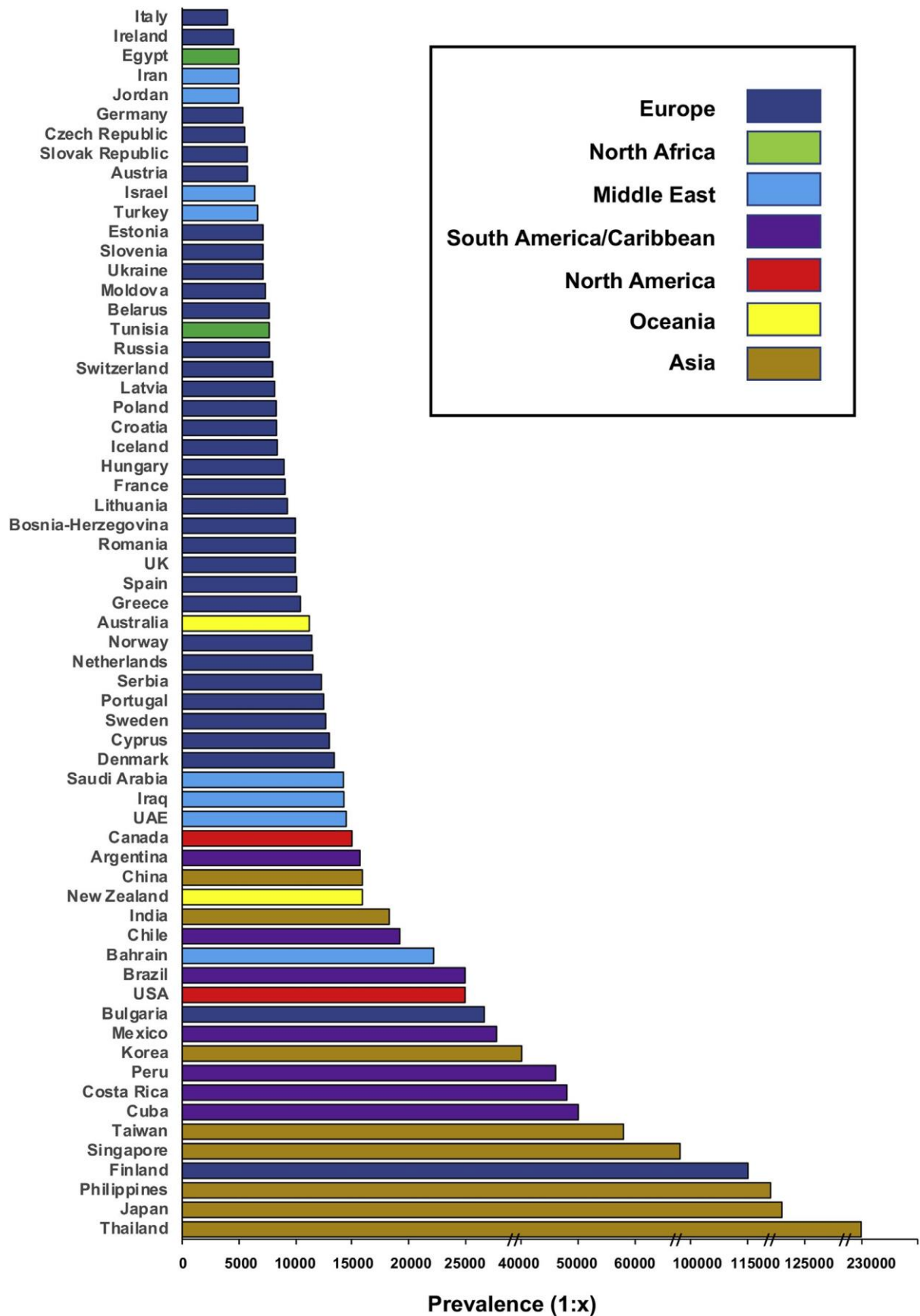
У фенілкетонурії існує широкий континуум фенотипів від важких до легких форм. Зазвичай її класифікують за ступенем тяжкості гіперфенілаланінемії на момент встановлення діагнозу. Класична або важка форма ФКУ зазвичай характеризується концентрацією фенілаланіну в крові  $>1200$  ммоль/л з переносимістю фенілаланіну не більше ніж 250 мг/добу для підтримки концентрації фенілаланіну в плазмі крові  $<360$  ммоль/л. Помірна ФКУ класифікується з діагностичною концентрацією фенілаланіну 600–1200 ммоль/л. Зазвичай пацієнти можуть споживати 200–500 мг/день фенілаланіну з їжею, підтримуючи концентрацію фенілаланіну  $<360$  ммоль/л [58].

Фенілкетонурія залишається однією з найпоширеніших вроджених помилок метаболізму. Проте у різних країнах різна поширеність цього захворювання.

Глобальна поширеність ФКУ становить 1:23 930 новонароджених (рис. 1.2) [42].

Поширеність ФКУ найвища в Європі та деяких країнах Близького Сходу. Італія (1:4000) та Ірландія (1:4545) мають навіть вищу поширеність, ніж Іран, Йорданія (обидві 1:5000) та Туреччина (1:6667). Однак у Саудівській Аравії (1:14 245), Іраку (1:14 286) та Об'єднаних Арабських Еміратах (1:14 493) ФКУ менше поширена.

Поширеність ФКУ також висока в країнах Центральної Європи, наприклад, у Німеччині (1:5 360), Чехії (1:5 521), Австрії (1:5 764). Словаччина (1:5 753). Словенія (1:7 143) і Польща (1: 8 309) мають подібні показники до Східної Європи, наприклад, Україна (1:7 143), Білорусь (1:7 692) і Хорватія (1:8,333).



**Рис.1.2 – Поширеність ФКУ (всі фенотипи) у 64 країнах 6 регіонів світу.**

ФКУ зустрічався трохи рідше в Західній Європі, наприклад, у Франції (1:9 091), Великобританії (1:10 000), Бельгії (1:11 000) та Нідерландах (1:546), а також у Південній Європі, наприклад, Іспанії (1:10 115) та Португалії (1:12 500).

Північна Європа показала найнижчі показники ФКУ в Європі, наприклад, Норвегія (1:11 457), Швеція (1:12 681), Данія (1:13 434), і лише 1:112 000 у Фінляндії.

ФКУ зустрічається частіше в Канаді (1:15 000), ніж у Сполучених Штатах Америки (1:25 000) та в країнах Латинської Америки, наприклад, в Аргентині (1:15 715), Чилі (1:19 231), Бразилії (1:25 000), Мексиці (1:27 778) та Перу (1:46 970).

Найнижча поширеність ФКУ в азіатських країнах, таких як Таїланд (1:227 273), Японія (1:125 000), Філіппіни (1:116 006) та Сінгапур (1:83 333). Єдиний виняток це Китай, де поширеність ФКУ становить 1:15 924, що порівняно близько до кількості хворих в Європі [42].

Після діагностики фенілкетонурії, стандарт лікування ФКУ в дитинстві та протягом усього життя включає сувору щоденну дієтотерапію, щоб мінімізувати споживання фенілаланіну в їжі, і споживання медичних добавок, як правило, сумішей L-амінокислот без фенілаланіну (суміші великих нейтральних амінокислот отримані з природніх білків з подальшим вилученням фенілаланіну) протягом дня для забезпечення харчових потреб [115].

У 2017 році в Європі було розроблено настанови щодо діагностики та лікування фенілкетонурії. Фахівці з 10 різних європейських країн розробили 70 положень, які базуються на найновітніших наукових дослідженнях [115].

Основні рекомендації, які повинні бути пріоритетні для впровадження, в основному стосуються початку лікування, цільових рівнів фенілаланіну у крові та подальшого спостереження. Також сформульовані мінімальні вимоги щодо спостереження за пацієнтами з ФКУ.

Деякі люди з ФКУ продовжують відчувати неоптимальні результати незважаючи на ранню дієтотерапію, включаючи вплив на ріст, харчування та підвищення рівня нейрокогнітивних порушень у підлітковому / ранньому дорослому віці порівняно зі здоровими людьми [6, 29, 119]. Подібна тенденція спостерігається щодо порушень психосоціальних функцій та якості життя пацієнтів, які перебувають на дієтотерапії [29]. Дослідження у дорослих із ФКУ, у тому числі з ФКУ з раннім лікуванням, також показали більшу частоту емоційних розладів, включаючи тривогу та депресію, порівняно із загальною популяцією. Цей зв'язок більш виражений у осіб із ознаками високого рівня фенілаланіну в крові [6,10,11].

Для деяких пацієнтів доречно використовувати альтернативні медичні добавки до звичайних формул L-амінокислот, які не містять ФА, щоб врахувати різні переваги лікування. Глікомакропептидні добавки з низьким вмістом ФА пов'язані з покращенням смаку та мають подібний вплив на рівень ФА порівняно з формулами L-амінокислот [112]. Інший варіант лікування, що полягає у використанні добавок великих нейтральних амінокислот (LNAA), може захистити від нейрокогнітивної дисфункції за допомогою різноманітних біологічних механізмів [18, 114]. Однак не всі пацієнти можуть реагувати на LNAA [18], а ті, хто отримує користь, все одно потребуватимуть лікування протягом усього життя.

Окрім традиційної дієтичної терапії та медичних добавок, для лікування пацієнтів із ФКУ з'явилося декілька недієтичних ліків, що відпускаються за рецептом. Активатор ферменту РАН сапроптерину дигідрохлорид (Kuvan ®) був схвалений Управлінням з харчових продуктів і медикаментів США (US FDA) і Європейським агентством з лікарських засобів (EMA) для лікування ФКУ у пацієнтів, які реагують на тетрагідробіоптерин (BH4) [67]. Було показано, що лікування сапроптерину дигідрохлоридом знижує рівні ФА крові протягом тривалого періоду часу та підвищує толерантність до ФА у дорослих і дітей, які реагують на лікування

[54, 67, 82]. Однак 50–75% осіб з класичною ФКУ не реагують на ВН4, і тому отримують мінімальну або не отримують ніякої користі від лікування. Крім того, навіть серед тих, хто реагує на лікування, часто все ще існує потреба в певному рівні дієтотерапії для підтримки цільових рівнів ФА в крові [103, 115, 117].

Зовсім недавно для лікування ФКУ стало можливе заміщення дефектної РАН за допомогою ферментної замісної терапії. Пегваліаза (Palynziq®) була схвалена FDA США у 2018 році та ЕМА у 2019 році для лікування дорослих пацієнтів із неконтрольованим рівнем ФА у крові (>600 мкмоль/л) за існуючого лікування [60]. Пегваліаза забезпечувала зниження рівня ФА в крові поряд із зменшенням симптомів неуважності та нерегулярного настрою в третій фазі клінічних досліджень [38, 110]. Однак, незважаючи на досягнення в лікуванні ФКУ, доступні на даний момент методи лікування не усувають основної дисфункції гена РАН, тому стан залишається невиліковним на даний момент.

Останні дослідження в сфері клінічної генної терапії продемонстрували що цілеспрямована корекція патогенних генів у моногенних розладах, таких як спінальна м'язова атрофія, має потенціал для ефективного лікування або запобігання виникненню захворювання. Лікування ФКУ методом генної терапії потенційно можливе, оскільки метаболізм Phe можна відновити шляхом експресії одного гена, тоді як рівень Phe в крові є легко вимірним біомаркером, який забезпечує чітко визначену терапевтичну кінцеву точку. Підтвердження концепції генної терапії ФКУ на тваринних моделях було вперше створено в 1994 році з використанням мишачої моделі ФКУ. Декілька фармацевтичних компаній оголосили про розробку методів генної терапії ФКУ, причому станом на березень 2021 року на сайті Clinicaltrials.gov представлено 2 дослідження, проведені на людях. Проте на сьогодні не існує ефективного та безпечного методу лікування ФКУ шляхом генної інженерії [85, 86].

Отже, на сьогодні по життєва дієтотерапія це єдиний ефективний спосіб лікування фенілкетолургії який ефективний майже для всіх пацієнтів з ФКУ і здатний забезпечити нормальний рівень життя хворим.

Згідно з повною версією Європейських настанов щодо фенілкетонурії, дієтотерапія складається з трьох основних складових: обмеження у споживання натурального білку, споживання добавок L-амінокислот без фенілаланіну та низькобілкової їжі.

Фенілаланін - незамінна, ароматична L-амінокислота кислота. Він необхідний для синтезу білка [85, 101] і тому повинен надходити в організм у кількості, що підтримує ріст і відновлення тканин у дитячому віці, а також відновлення тканин у дорослому віці, зберігаючи концентрацію фенілаланіну в плазмі крові в межах рекомендованих діапазонів [91].

Для того, щоб сприяти синтезу білка, важливо споживати максимально допустиму кількість натурального білка [59]. При ФКУ на індивідуальну переносимість фенілаланіну з їжею впливає багато факторів: ступінь тяжкості ФКУ, співвідношення чистого катаболізму і синтезу білка, споживання енергії, дозування і розподіл добавок L-амінокислот, що не містять фенілаланіну, а також цільові концентрації фенілаланіну в крові. Толерантність до фенілаланіну визначається індивідуально як кількість фенілаланіну на кг маси тіла або мг/добу, яка підтримує концентрацію фенілаланіну в крові в межах цільового діапазону [113]. Це також може бути описано як природна толерантність до білка, виражена в г/добу. При ФКУ, як правило, толерантність/потреба в фенілаланіні на кг маси тіла є найвищою в ранньому дитячому віці і становить від 55 мг/кг/добу у віці 0-3 місяці до 27 мг/кг/добу у віці 12 місяців [1]. Після 1 року спостерігається повільне і стійке зниження толерантності на кг маси тіла. Навіть з початку використання дієтотерапії для лікування ФКУ було визнано, що діти з класичною формою ФКУ зазвичай переносять лише від 200 до 500 мг фенілаланіну на добу. Пацієнти з більш легкою формою ФКУ (концентрація

фенілаланіну в крові менше 1000-1200 мкмоль/л до початку лікування), як правило, переносять  $\geq 500$  мг/добу фенілаланіну. Для порівняння, у пацієнтів без ФКУ третє Національне дослідження здоров'я та харчування США (NHANES III) показало, що середньодобове споживання фенілаланіну з їжею на всіх етапах життя та у всіх гендерних групах сягає 3400 мг/добу [71]. Тобто пацієнтам з усіма формами фенілкетонурії необхідно контролювати споживання фенілаланіну, і відмовитись від традиційних борошняних кондитерських виробів.

Для пацієнтів, які реагують на лікування ВН4, ймовірно, що природна толерантність до білка може збільшитись в два або чотири рази [13, 51].

Рекомендовано індивідуально визначати необхідну кількість фенілаланіну та природнього білка, які пацієнт може споживати, шляхом систематичної зміни природнього білку в раціоні пацієнта та вимірюванні рівню фенілаланіну в крові, при чому рекомендовано максимізувати споживання натурального білку зберігаючи кількість фенілаланіну в крові в межах цільового рівня. У разі споживання кондитерських виробів рекомендовано споживати цукристі кондитерські вироби, або спеціально розроблені «борошняні кондитерські вироби» з обмеженим використанням борошна, зокрема низькобілкове печиво.

Загальне споживання білка має відповідати рекомендованим нормам споживання білка для здорових людей різних вікових груп (ВООЗ) з заміною 40% природніх білків на L-амінокислотні добавки без фенілаланіну.

Хворі на фенілкетонурію мають таку саму потребу у макро- і мікронутрієнтах як і здорові люди.

Для всіх вікових груп слід зосередитися на досягненні збалансованого споживання всіх поживних речовин, уникаючи катаболізму або дефіциту, але запобігаючи надлишку будь-якої поживної речовини, що може призвести до переїдання або токсичності. Додаткові поживні речовини (вітаміни, мінерали та ПНЖК), що додаються до сумішей L-амінокислот без

фенілаланану, повинні бути в кількостях, які, відповідають дієтичним нормам для здорового населення [115].

Фрукти та овочі (за винятком картоплі), що містять фенілаланін  $\leq 75$  мг/100 г продукту, можна безпечно споживати без вимірювання або оцінки в дієті з низьким вмістом фенілаланіну без втрати контролю над рівнем фенілаланіну в крові. Деякі фрукти та овочі в необмеженій кількості слід заохочувати додавати в раціон у ранньому віці, щоб сприяти довготривалому здоровому харчуванню.

Штучний підсолоджувач аспартам, особливо у складу напоїв, та у вигляді підсолоджувачів готових для споживання, краще уникати пацієнтам, які дотримуються дієти з низьким вмістом феруму [115].

Враховуючи рекомендації Європейських настанов щодо фенілкетонурії, ми можемо зробити висновок про велику необхідність низькобілкових продуктів харчування, в тому числі печива, для підтримки якості життя та здоров'я хворих на фенілкетонурію.

## **1.2 Існуючі розробки кондитерських виробів для хворих на Фенілкетонурію**

Харчування, поряд з загальним способом життя, є потужним чинником, що впливає на здоров'я людини, якість та тривалість життя. Це обумовлює необхідність створення раціонів харчування та харчових продуктів для хворих на фенілкетонурію, які будуть відповідати вимогам до харчування різних вікових груп, фізичного навантаження, стану здоров'я .

Важливо виготовляти харчові продукти, які були б не лише носієм калорій, а й мали заданий хімічний склад, що:

– формує харчову, енергетичну та біологічну цінність виробу з врахуванням: вікових особливостей (діти, особи середнього та похилого віку); виду виконуваної роботи та фізичного навантаження; екологічних умов проживання; стану здоров'я та виду захворювання (цукровий діабет, целіакія, харчові алергії та ін.) тощо [32].

– сприяє нормалізації та відновленню метаболічних процесів в організмі, надає виробам оздоровчо-профілактичних властивостей.

В цьому контексті доцільно говорити про розроблення харчових продуктів спрямованої дії, спеціального призначення. В Законі України «Про безпечність та якість харчових продуктів» (1997 р) виділено лише «Харчовий продукт для спеціальних медичних цілей» та «харчовий продукт для контролю ваги». Дається наступне визначення [163]:

- харчовий продукт для спеціальних медичних цілей - спеціально розроблений та виготовлений продукт, який споживається під наглядом лікаря. Цей продукт призначений для часткової або повної заміни звичайного раціону харчування пацієнтів з обмеженою, ослабленою або порушеною здатністю приймати, перетравлювати, засвоювати звичайні харчові продукти або певні поживні речовини, що містяться в них, або їх метаболіти. Харчові продукти для спеціальних медичних цілей також можуть призначатися для повного або часткового годування пацієнтів з іншими визначеними лікарями потребами, які неможливо задовольнити шляхом модифікації звичайного раціону харчування;

- харчовий продукт для контролю ваги - спеціально розроблений та виготовлений харчовий продукт, призначений для вживання під час дотримання низькокалорійного раціону харчування для зменшення ваги, який при вживанні згідно з інструкцією оператора ринку заміняє щоденний раціон харчування [63].

Таким чином, згідно чинного законодавства, низькобілкові продукти харчування для хворих на фенілкетонурію ми можемо віднести до харчових продуктів для спеціальних медичних цілей.

Борошняні кондитерські вироби, зокрема печиво, широко поширені в усьому світі. Такі вироби містять відносно високий вміст білку для (5,4-7,0 г білку на 100 г продукту) і фенілаланіну (260-538 мг фенілаланіну на 100 г продукту) для хворих на фенілкетонурію. Через це ця група населення їх

споживати зовсім не можуть, або можуть споживати в суттєво обмеженій кількості [31].

На день оприлюднення цієї роботи в Україні не має зареєстрованих операторів ринку, які б виготовляли низькобілкові продукти харчування для хворих на фенілкетонурію.

Проте в інших країнах існує виробництво таких продуктів узагальнена інформація наведена в таблиці 1.2.1.

**Таблиця 1.2.1 – Перелік компаній та постачальників низькобілкових продуктів харчування для немовлят, дітей, підлітків та дорослих**

| Назва компанії / постачальника | Веб-сайт   | Продукція  |
|--------------------------------|--|--|
| Cambrooke Foods [2]            | <a href="http://www.cambrookefoods.com">www.cambrookefoods.com</a> | Макаронні вироби, хліб, снеки, суміші для випічки, готові продукти, імітація високобілкових продуктів, рецепти                                     |
| Dietary Specialties [23]       | <a href="http://www.dietspec.com">www.dietspec.com</a>             | Суміші для випічки, хліб, десерти та снеки, макаронні вироби, імітація високобілкових продуктів, страви швидкого приготування, заморожені продукти |
| Glutenex [39]                  | <a href="http://www.glutenex.pl/en/">www.glutenex.pl/en/</a>       | Хліб і хлібобулочні вироби, печиво, сухі сніданки, хлібці, снеки, паста, суміші для випічки  |
| Ener-G Foods [28]              | <a href="http://www.ener-g.com">www.ener-g.com</a>                 | Суміші для випічки, хліб, включаючи деякі унікальні сорти, десерти та снеки, макаронні вироби, імітація  |

|                         |  |  |
|-------------------------|--|--|
|                         |  | високобілкових продуктів, супові бульйони, замітник яєць, пшеничний крохмаль, мигдальний та шоколадний порошки   |
| Vitaflo [116]           | <a href="http://www.vitaflo.co.uk">www.vitaflo.co.uk</a>               | Асортимент заміників протеїну для ФКУ, що відповідають віковим особливостям, стилю життя та мають приємний смак, включаючи дитячу суміш, замітник протеїну зі смаком яблука та банана. |
| Yes we cook that [128]  | <a href="http://www.yeswecookthat.com">www.yeswecookthat.com</a>       | Харчові концентрати, снеки, борошно, замітники яєць, молочні продукти та макаронні вироби  |
| SHS UK [36]             | <a href="http://www.shs-group.co.uk">www.shs-group.co.uk</a>           | Постачальники низькобілкових продуктів харчування та заміників білка   |
| Promin [81]             | <a href="http://www.prominpku.com">www.prominpku.com</a>               | Сухі сніданки, суміші для бургерів, торти, десерти, макарони, пудинги, ковбасні суміші, закуски, супи, намазки   |
| Fate Special Foods [43] | <a href="http://www.fatespecialfoods.com">www.fatespecialfoods.com</a> | Універсальна суміш для випікання та суміш для тортів   |
| PKU Perspectives [80]   | <a href="http://www.pkuperspectives.com">www.pkuperspectives.com</a>   | Печиво, торти, тістечка, кекси, кекси, універсальні суміші, млинці, крохмальне   |

|                |  |  |
|----------------|--|--|
|                |  | борошно, хліб, сир, чіпси, снеки, шоколад і цукерки, бургери і котлети, замітник яєць, морозиво, замітник молока, макарони, рис та багато іншого               |
| Delifirst [21] | <a href="http://www.delifirst.de">www.delifirst.de</a> | Хліб, печиво, омлет з низьким вмістом білка, низькобілкова ковбаса, печиво, кекси, сир, спред, макарони, піца, рис, замітники молока, сухе молоко, сир, вершки |

Не зважаючи на те, що у світі існує виробництво низькобілкових виробів, публікації щодо розробки таких виробів відсутні. При виробництві низькобілкового печива важливо змодельювати властивості білків, зокрема клейковини та яєць, за допомогою інших низькобілкових компонентів з метою отримати структуру та смак традиційних виробів звичних для споживача [105].

У таблиці 1.2.2 наведено склад низькобілкового печива, яке виробляється закордонними виробниками.

**Таблиця 1.2.2 – Низькобілкове печиво закордонних виробників**

| Назва печива               | Виробник, країна            | Вид крохмалю, харчових добавок (структурутворювачів)                    | Кількість білка, ФА                    |
|----------------------------|-----------------------------|---|--|
| «Маркізи» з начинкою тоффі | Компанія «Valviten», Польща | кукурудзяний крохмаль, безглютеновий пшеничний крохмаль, гуарова камідь | Білки – 0,8 г<br>Фенілаланін – 28,6 мг |
| Печиво пісочне             |                             | кукурудзяний крохмаль, безглютеновий                                    | Білки – 0,3 г<br>Фенілаланін – 7,6 мг  |

|  |   |  |  |
|--|---|--|--|
|  |   | пшеничний крохмаль,<br>гуарова камідь,   |  |
| «Harifen»<br>печиво з<br>карамеллю                 | Компанія<br>«Hammer<br>Mühle»,<br>Німеччина | картопляний,<br>пшеничний та<br>тапіоковий крохмаль,<br>метилцелюлоза                    | Білки – 0,35 г<br>Фенілаланін – 8,3 мг |
| Низькобілк<br>ове печиво<br>«Biscotto»             | Компанія<br>«Aproten»,<br>Італія            | кукурудзяний та<br>тапіоковий крохмаль,<br>мальтодекстрин                                | Білки – 1,0 г<br>Фенілаланін – 60 мг   |
| Низькобілк<br>ове печиво<br>«Масляне»              | Компанія<br>«Bezgluten»<br>,<br>Польща      | кукурудзяний крохмаль,<br>безглютеновий<br>пшеничний крохмаль,<br>гуарова камідь         | Білки – 0,2 г<br>Фенілаланін – 8 мг    |
| Низькобілк<br>ове печиво<br>«Фруктова<br>фантазія» | Компанія<br>«Glutenex»,<br>Польща           | кукурудзяний крохмаль,<br>безглютеновий<br>пшеничний крохмаль,<br>гуарова камідь         | Білки – 0,9 г<br>Фенілаланін – 38 мг   |
| Низькобілк<br>ове печиво<br>«Медведик<br>и»        | Компанія<br>«Bezgluten»<br>,<br>Польща      | пшеничний крохмаль,<br>картопляний крохмаль,<br>кукурудзяний крохмаль,<br>гуарова камідь | Білки – 0,5 г<br>Фенілаланін – 7 мг    |

Як видно з даних у таблиці, всі існуючі вироби все ж таки містять невелику кількість білку і фенілаланіну. Варто зазначити, що технологія таких виробів та їх рецептурні композиції тримаються виробниками у таємниці. У таких низькобілкових тістових системах всі перетворення під час технологічного процесу відбуваються відмінно від перетворень, які спостерігаються під час виробництва традиційних виробів [24, 25]. В першу чергу це пов'язано з відсутністю білків та іншими міжмолекулярними взаємодіями під час технологічних процесів, зокрема під час замісу тіста і випікання. Процеси, що відбуваються в низькобілкових тістових системах під час виробництва низькобілкових виробів не вивчені і потребують подальшого вивчення з метою удосконалення технології низькобілкового печива [26, 27]. Проведення комплексу досліджень з метою удосконалення

технології низькобілкового печива заповнить прогалину в існуючих дослідженнях щодо процесів, що відбуваються під час технологічного процесу виробництва таких виробів, і сприятиме розвитку виробництва низькобілкового печива, що допоможе покращити рівень життя хворих на фенілкетонурію.

### **1.3 Обґрунтування виробу основних рецептурних компонентів та структуроутворювачів**

Більшість сировинних інгредієнтів, які використовуються у традиційних борошняних виробках, містять у своєму складі білки і відповідно фенілаланін.

Вченими Національного інституту харчових продуктів Технічного університету Данії було розроблено та опубліковано базу даних Frida Food Data [31] з метою полегшити доступ громадськості до інформації про хімічний склад продуктів харчування. Frida Food Data містить дані про вміст поживних речовин у різних продуктах харчування, і автори бази даних прагнуть забезпечити, щоб дані були максимально коректними та актуальними. Для досягнення найкращої якості Frida Food Data підтримується у співпраці з галузевими асоціаціями та роздрібними компаніями, скандинавськими та міжнародними колегами, і не в останню чергу з Данською ветеринарною та харчовою адміністрацією.

Під час проведення досліджень було використано дані хімічного складу сировини з бази даних Frida версії 5.0 (червень 2023) та Frida версії 4.2 (червень 2022). Frida версії 5.0 відрізняється від версії 4.2 в основному додаванням нових продуктів харчування.

Дані представлені в таблицях з розподілом на поживні речовини: мікроелементи, вітаміни, мінерали та неорганічні речовини, органічні кислоти, біогенні аміни, вуглеводи, насичені жирні кислоти,

мононенасичені жирні кислоти, поліненасичені жирні кислоти, суми жирних кислот, стероли, амінокислоти

Дані про вміст поживних речовин у продуктах харчування взяті з:

- дані отримані в результаті аналізу продуктів харчування, які були проаналізовані в данських акредитованих лабораторіях;
- запозичені значення з баз даних інших країн, промисловості та торгівлі;
- оціночні значення: За відсутності аналітичних даних, в деяких випадках дані можуть бути перенесені з продуктів, подібних до фактичного продукту, або розраховані на основі різних аналітичних даних

0 (нуль) у колонці вмісту означає або те, що природний вміст речовини, про яку йдеться, дорівнює нулю, або те, що існують сліди речовини, але їх кількість настільки мала, що не має значення. Для будь-якого продукту харчування теоретичне значення суми макроелементів (білки, доступні вуглеводи, харчові волокна, жири, алкоголь, зола і вода) завжди буде давати рівно 100 г/100 г продукту. Це також стосується випадків, коли вуглеводи розраховуються за різницею на основі проаналізованих значень.

Вміст білку і фенілаланіну в сировині, яка зазвичай використовується у виробництві низькобілкових виробів наведена в таблиці 1.3.1.

**Таблиця 1.3.1 – Вміст білку і фенілаланіну**

| Назва сировини                   | Вміст білку у 100 г продукту, г | Вміст фенілаланіну у 100 г продукту, мг |
|----------------------------------|---------------------------------|---|
| Борошно пшеничне хлібопекарське  | 10.0                            | 538                                     |
| Борошно з твердих сортів пшениці | 12.4                            | 640                                     |
| Борошно рисове                   | 7.3                             | 393                                     |

|                                   |      |      |
|-----------------------------------|------|------|
| Борошно кукурудзяне               | 6.8  | 348  |
| Борошно гречане                   | 12.0 | 583  |
| Крохмаль картопляний              | 0.2  | 8    |
| Яйця                              | 12.3 | 711  |
| Яечний порошок                    | 50.7 | 2840 |
| Молоко незбиране, 3,5 % жирності  | 3.4  | 172  |
| Молоко, знежирене, 0,5 % жирності | 3.5  | 180  |
| Вершки, 18 % жирності             | 2.7  | 135  |
| Молоко сухе незбиране             | 23.9 | 1200 |
| Масло вершкове                    | 0.2  | 25   |
| Олія кукурудзяна                  | 0.0  | 0.0  |
| Моркв'яне пюре                    | 0,4  | 0    |
| Мигдаль                           | 21.2 | 1210 |
| Арахіс                            | 25.8 | 1670 |

З даних наведених у таблиці 1.3.1 видно, що використовувати борошно пшеничне, рисове, або гречане не доцільно. Яйце продукти та молокопродукти містять навіть більший вміст білку і фенілаланіну, ніж борошно тому необхідно замінити ці інгредієнти на низькобілкові у технології печива для хворих на фенілкетонурію.

Наразі існує низка проблем, пов'язаних з виробництвом низькобілкових та безбілкових борошняних продуктів, які за якістю не поступалися б своїм білковим аналогам [136, 143]. Ці проблеми пов'язані зі структурою готових виробів та напівфабрикатів, органолептичними властивостями, терміном придатності та поживними властивостями низькобілкових та безбілкових борошняних продуктів.

Відсутність клейковини, яка відповідає за формування в'язко-еластичного тіста, здатного утримувати газ під час бродіння або розпушення і, відповідно, надавати виробам з пшеничного борошна пишності, зв'язності та еластичності [130], повинна бути замінена в низькобілкових виробках. Крім того, процес черствіння, який включає ретроградацію крохмалю під час зберігання, прискорюється в низькобілкових продуктах через високі пропорції крохмалю та води, необхідні в цих рецептурах для структурних цілей [98]. Клейковинний каркас значною мірою відповідає за важливі реологічні характеристики тіста, такі як еластичність, розтяжність, стійкість до розтягування, толерантність до змішування та здатність утримувати газ [130]. Безбілкове тісто для печива, зокрема без глютену, має пастоподібну або маслянисту консистенцію, що суттєво ускладнює процес замісу і формування на існуючому обладнанні. Крім того, кінцевий продукт не має чіткої форми, звичної структури і об'єму.

Крім клейковини, важливий позитивний вплив на характеристики тіста і готових виробів мають яйцепродукти [40, 126]. Основними функціями яйцепродуктів в харчових продуктах є піноутворення, коагуляція, емульгування, контроль кристалізації цукру, а також покращення кольору та аромату [127]. Піноутворююча здатність яєць пов'язана з яєчним білком (альбуміном), і навіть вважається еталонною щодо піноутворюючої здатності [5]. Крім того, яєчний жовток діє як емульгатор, завдяки вмісту лецитину, і, таким чином, покращує структуру напівфабрикатів і готових виробів [74]. Білки яєчного білка і жовтка також відповідають за желюючі властивості [5], і, зокрема, білки жовтка сприяють формуванню структури борошняних кондитерських виробів, підвищуючи стабільність м'якушки [22]. Крім того, жовтий колір походить від композиції каротиноїдів яєчного жовтка, що складається переважно з каротину та ксантофілів [122], які також сприяють характерному жовтуватому кольору різних борошняних виробів. На сьогоднішній день існує ряд досліджень, які описують позитивний вплив

різних яйцезамінників на фізико хімічні і органолептичні показники готових борошняних виробів. Одними з перспективних яйцезамінників у виробництві низькобілкових борошняних виробів є гідроколоїди [127].

Функціональність високобілкової сировини (такої як клейковина та яйцепродукти) повинна бути імітована і замінена в низькобілкових продуктах [144, 145, 146].

*Використання гідроколоїдів.*

У рецептурах безбілкових борошняних виробів на основі крохмалю додавання в'язкопружних полімерів, які могли б відігравати роль замінників клейковини [45, 46], необхідне для утворення тіста, здатного стабілізувати клітини на межі розділу фаз газ-тісто. Газоутримуючу властивість клейковинно-крохмального тіста складно відтворити в безбілковій системі. Тому для покращення газоутримання та стабілізації клітин до складу тіста включають поверхнево-активні речовини, такі як гідроколоїди, що покращують загальні хлібопекарські властивості крохмалю. Властивості багатьох гідроколоїдів, які сьогодні використовуються для виробництва борошняних виробів, у тому числі печива та хлібобулочних виробів, та їхні специфічні властивості описані в таблиці 1.3.2. Багато досліджень було присвячено взаємодії камеді та крохмалю, що дозволило виявити їх вплив на реологічні, гелеутворювальні та ретроградаційні властивості крохмалю [17, 72, 78, 133].

**Табл 1.3.1 Гідроколоїди, що використовуються для виробництва борошняних виробів, з потенціалом для виробництва низькобілкових/ безбілкових продуктів [130].**

| Назва гідроколоїда | Джерело                       | Вплив на готові борошняні вироби  |
|--------------------|-------------------------------|---|
| Гуарова камедь     | Cyamopsis tetragonoloba seeds | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Збільшення об'єму виробів</li> <li>• Пом'якшення м'якушки [94, 120]</li> </ul> |

|                         |  |   |
|-------------------------|--|---|
| Карбоксиметил-целлюлоза | Целлюлоза  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Збільшення об'єму виробів</li> <li>• Пом'якшення м'якушки</li> <li>• Покращений смак завдяки текстурувальному та жироподібному ефектам [19, 94, 120 ]</li> </ul> |
| Камедь ріжкового дерева | <i>Ceratonia siliqua</i>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Затримує черствіння [99]</li> </ul>  |
| Пектин                  | Цедра цитрусових або яблучні вичавки                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Покращує об'єм</li> <li>• Покращує органолептичні характеристики [64, 99, 120]</li> </ul>  |
| Полідекстроза           | Синтезується з глюкози   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Затримує черствіння</li> <li>• Замінник жиру</li> <li>• Покращує органолептичні показники [30, 83]</li> </ul>  |
| Ксантанова камедь       | Синтезується мікроорганізмами <i>Xanthomonas campestris bacteria</i> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Об'єм виробів не змінюється</li> <li>• Підвищує пружність напівфабрикатів та булочних виробів [53, 120]</li> </ul>   |
| Карагенан               | Червоні водорості — <i>Lithothamnium calcareum</i>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Більш рівномірна структура м'якушки</li> <li>• Покращує об'єм</li> <li>• Покращує органолептичні характеристики [73]</li> </ul>                                  |

Крім позитивного впливу на готові вироби, деякі гідроколоїди також можуть суттєво покращувати якість напівфабрикатів. Наприклад камеді здатні позитивно впливати на реологічні властивості тіста і широко використовуються як загущувачі та стабілізатори в хлібобулочних виробках, особливо в деяких безглютенових хлібобулочних виробках. Камеді ксантану камедь, гуару та карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), додають до хлібобулочних виробів, оскільки вони покращують реологічні властивості тіста, полегшують гідратацію сухих інгредієнтів та допомагають контролювати

вологість кінцевого продукту [53, 109]. В одному з досліджень порівнювали вплив гуарової камеді, камеді акації, ксантану і трагаканта на гречане печиво і зазначили, що якість гречаного печива з ксантановою камеді була порівнянна з печивом, виготовленим з пшеничного борошна [50, 125]. Тому для удосконалення технології низькобілкового печива було прийнято рішення використовувати камеді ксантану, гуару та КМЦ.

#### *Використання крохмалів.*

Крохмаль є важливим інгредієнтом у виробництві борошняних виробів з низьким вмістом білка, який замінює білкове борошно. До широко використовуваних і доступних крохмалів належать крохмалі з пшениці, кукурудзи, тапіоки, картоплі та рису, які є ідеальними інертними наповнювачами в безперервній матриці тіста [12]. Вони демонструють багато корисних властивостей при використанні в якості харчових інгредієнтів, включаючи емульгування, загущення, гелеутворення, текстурування, утворення плівки та утримання вологи [129]. Вони широко використовуються в безглютенінових виробках, проте інформація пов'язана з розробкою виробів з низьким вмістом білка майже відсутня [73].

Нативний кукурудзяний крохмаль є найбільш широко використовуваним інгредієнтом у виробництві безглютенінових хлібо-булочних і борошняних кондитерських виробів. Частково це пов'язано з його великою доступністю, низькою вартістю, та безпечністю з точки зору відсутності перехресного забруднення глютеніном. Однак найбільша перевага кукурудзяного крохмалю полягає в можливості отримання продуктів більшого об'єму порівняно з іншими альтернативними джерелами крохмалю [8, 62], відмінності з іншими видами крохмалю залежать від використовуваного гідроколоїдів у комбінації з крохалями. Продукти, виготовлені з кукурудзяного крохмалю, мають сухішу текстуру [61].

Ще одним широко використовуваним інгредієнтом для виробництва безглютенінових продуктів є крохмаль з коренеплодів, таких як тапіока або

картопляний крохмаль [88]. Ці крохмалі самі по собі утворюють вироби з меншим об'ємом, ніж вироби, отримані з кукурудзяного крохмалю. Менший об'єм пояснюється більшим розміром гранул кореневого крохмалю, що перешкоджає утворенню більш закритої крохмально-гідролоїдної матриці [62]. Більш детальне дослідження було проведено у використанні крохмалів у технології безглютенового хліба. У випадку з пшеничним крохмалем менші гранули дозволяють хлібу мати більш закриті альвеоли і меншу твердість, поєднання менших і більших гранул дозволяє хлібу мати більший питомий об'єм [89]. Основною перевагою корневих крохмалів, особливо тапіокового, є покращення текстури порівняно з виробами, виготовленими з кукурудзяного крохмалю, тому багато досліджень рекомендують змішувати обидва типи крохмалів [63, 96, 100]. Це покращення пояснюється їхньою меншою ретроградаційною здатністю. Насправді, воскоподібні крохмалі можуть поліпшують текстуру борошняних виробів, зменшуючи їх твердість, при використанні в низьких дозах (10-15%) [121]. Однак при використанні високих рівнів вони значно зменшують об'єм хліба і збільшують його твердість [90].

Для подальшої роботи нами було обрано дослідити можливості використання картопляного, кукурудзяного і тапіокового крохмалів для удосконалення технології низькобілкового печива.

### **Висновки до розділу 1**

1. Описано проблематику захворювання на фенілкетонурію та дієтотерапію. Наведено дані щодо розповсюдження захворювання, симптоматику та методи лікування.

2. Зазначено, що дієтотерапія є єдиним дієвим методом лікування фенілкетонурії. Описано рекомендації щодо низькобілкової дієти та добової норми споживання фенілаланіну для хворих на фенілкетонурію.

3. Проаналізовано ринок низькобілкових виробів, які могли б споживати хворі на фенілкетонурію та наукові публікації щодо розробки

низькобілкових виробів. Зазначено необхідність подальшої розробки таких виробів та впровадження їх у виробництво.

4. За інформаційними джерелами визначено, що до складу традиційного печива входять рецептурні компоненти з відносно високим вмістом фенілаланіну. При розробці низькобілкових виробів такі компоненти необхідно замінити з метою зниження рівня фенілаланіну в готових виробах.

5. Огляд літературних джерел показав, що відсутні ґрунтовні публікації щодо розробки рецептур низькобілкового печива та удосконалення його технології. Відсутні дані щодо структурно-механічних та реологічних властивостей низькобілкових напівфабрикатів, взаємодії низькобілкових рецептурних компонентів між собою у тістових системах, перебігу процесу термічної обробки обробки.

6. Глютен та яєчні білки забезпечують напівфабрикати печива необхідними структурно-механічними та реологічними властивостями що формує якість готових виробів. У технології низькобілкових виробів доцільно використовувати різні види низькобілкових крохмалів у поєднанні з гідроколоїдами для забезпечення необхідної структури.

7. Для подальшої роботи над удосконаленням технології низькобілкового печива було обрано гідроколоїди (камедь ксантану, камедь гуару, карбоксиметилцеллюлозу) та крохмалі (картопляний, кукурудзяний, тапіоковий).

## РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТІВ, ПРЕДМЕТІВ, МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

### 2.1 Характеристика об'єктів та предметів досліджень

Об'єктом наукових досліджень дисертаційної роботи є технологія низькобілкового печива.

Предметами досліджень були крохмалі (картопляний, кукурудзяний та тапіоковий), структуроутворювачі (карбоксиметилцеллюлоза, камеді гуару і ксантану), емульсії для приготування тіста, тісто, тістові заготовки та виготовлене низькобілкове печиво.

В ході проведення наукових досліджень використовували наступну сировину:

Крохмаль картопляний ДСТУ 4286:2004 Крохмаль картопляний.

Крохмаль кукурудзяний безглютеновий ТМ Dr.Oetker.

Органічний тапіоковий крохмаль ТМ Let's Do Organic, Edward & Sons.

Цукор білий кристалічний ДСТУ 4623:2006 Цукор білий. Технічні умови.

Карбоксиметилцеллюлоза CAS 9004-32-4.

Камедь ксантана CAS 11138-66-2.

Камедь гуару CAS 9000-30-0.

Вершкове масло ДСТУ 4399:2005 Масло вершкове.

Амоній бікарбонат ТМ Dr.Oetker.

Сода харчова ТУУ 20.1-30352116-031:2020.

Ванільна пудра ДСТУ 1009:2005 Цукор ванільний.

Кукурудзяна олія ДСТУ ГОСТ 8808:2003 Олія кукурудзяна.

Борошно пшеничне вищого сорту ДСТУ 46.004-99 Борошно пшеничне.

Борошно пшеничне першого сорту ГСТУ 46.004-99 Борошно пшеничне.

Патока ДСТУ 4498:2005 Патока крохмальна.

Мальтодекстрин CAS 9050-36-6

Пюре моркв'яне ДСТУ 4084-2001. Консерви фруктові пюреподібні для дитячого харчування

Какао порошок ДСТУ 4391:2017 Какао-порошок.

Кориця мелена ТУУ 10.8-01553439-006:2013.

Блок-схема досліджень направлених на удосконалення технології низькобілкового печива наведена на рис. 2.1.1.

## **2.2. Організація експерименту**

Наукові дослідження для дисертаційної роботи проводились в лабораторіях Кафедри технології хлібопекарських і кондитерських виробів Навчально-наукового інституту харчових технологій Національного університету харчових технологій, лабораторіях «Інженерії харчових процесів» та «Сталого виробництва харчових продуктів» Інституту харчових продуктів, нутриціології та здоров'я Департаменту наук і технологій охорони здоров'я Швейцарської вищої технічної школи Цюріха та у випробувальній лабораторії державного підприємства «Державний центр сертифікації і експертизи сільськогосподарської продукції».

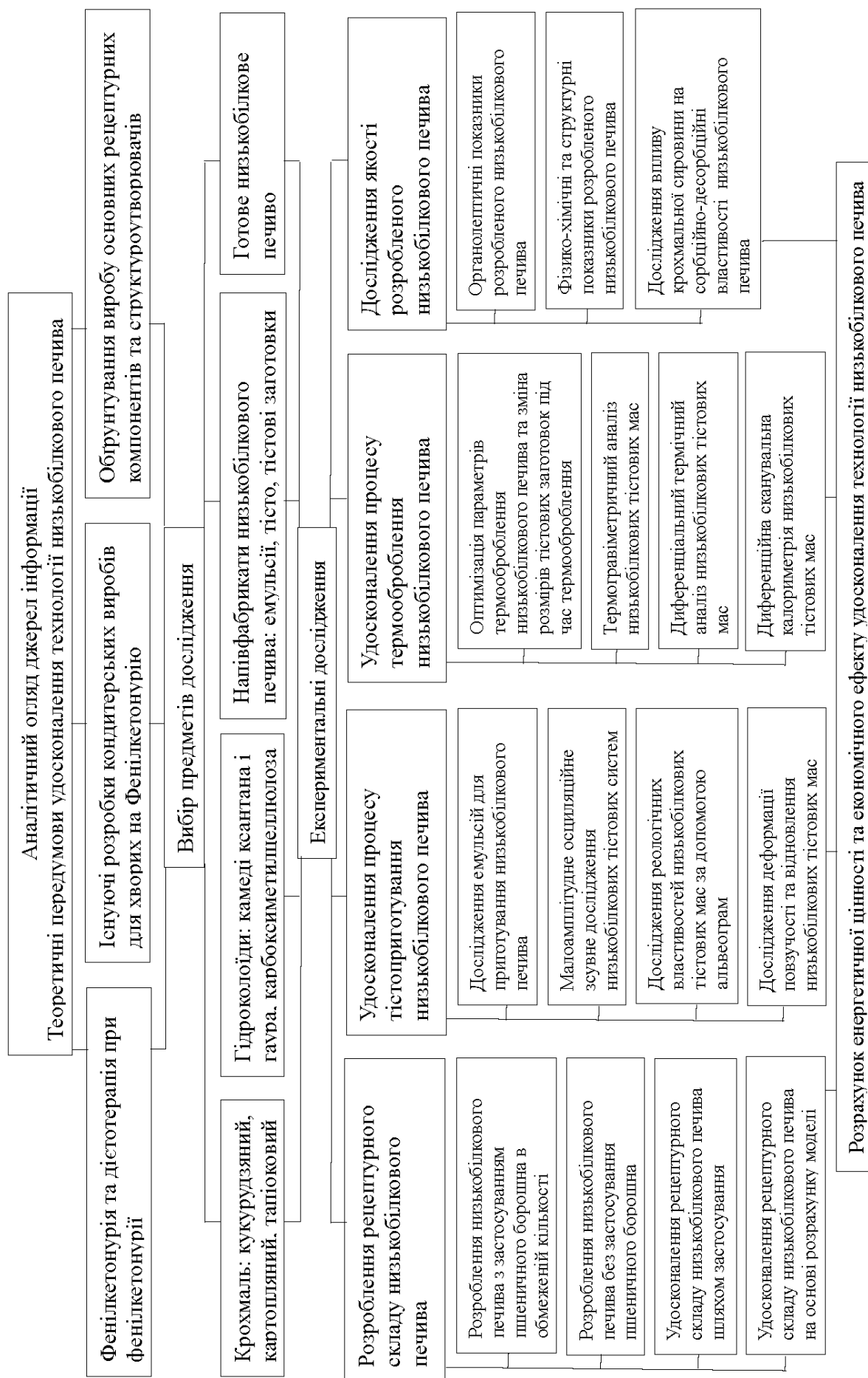


Рис. 2.3.1 – Блок-схема досліджень направлених на удосконалення технології низькобілкового печива

## 2.3 Методи досліджень.

### 2.3.1 Методи дослідження сировини та напівфабрикатів

*Органолептична оцінка сировини*, що використовувалась у дослідженнях проводилась згідно ДСТУ [162].

*Визначення масової частки вологи сировини та тіста* проводили шляхом висушування наважки досліджуваного продукту в сушильній шафі СЕШ-3М [139].

*Визначення граничної напруги тіста* проводили за допомогою Пенетрометра [139].

*Приготування емульсій* відбувалося ідентичним шляхом для всіх досліджуваних рецептурних композицій. Цукор був розчинений у воді, масло розтоплене, камідь вносились у сипкому вигляді. Всі попередньо підготовлені компоненти змішувались між собою і збивались при температурі 40°C протягом 10 хвилин .

*Визначення динамічної в'язкості емульсій*

В'язкість рідини - це міра її внутрішнього тертя. Коли до рідини прикладається сила, це викликає деформацію рідини, яка називається течією.

Зазвичай прикладену силу виражають як напруження зсуву  $\tau$  [49]:

$$\tau = \frac{F}{A}, \quad (2.3.1)$$

де F—дотична сила;

A – площа поверхні досліджуваного зразка.

Для опису взаємозв'язку між напруженням зсуву  $\tau$  і швидкістю зсуву рідини  $\gamma$  зазвичай використовують складове. Якщо напруження зсуву  $\tau$  пропорційне швидкості зсуву  $\gamma$  , ми говоримо, що рідина підпорядковується закону Ньютона. Її динамічна в'язкість  $\eta$  дорівнює:

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma}, \quad (2.3.2)$$

де  $\tau$ —напруга зсуву, яка є дотичною силою на одиницю площі;

$\gamma$  – швидкість зсуву, тобто деформація зсуву що змінюється з часом.

Рідини, які підпорядковуються законам Ньютона, називаються ньютонівськими рідинами. Ті, що не підпорядковуються законам Ньютона, називаються неньютонівськими рідинами. На фактичну в'язкість рідин часто впливають різні зовнішні фактори (температура, тиск тощо), тому вона не є постійною величиною. Однак зміни в'язкості, спричинені зовнішніми факторами, не впливають на властивості рідини. Тому зовнішні фактори не змінюють властивостей рідини, тобто, чи є рідина ньютонівською або неньютонівською, визначається лише її внутрішніми властивостями. Якщо в'язкість змінюється залежно від швидкості зсуву або напруги зсуву, вона вже не відповідає визначенню в'язкості ньютонівської рідини. Тому її модель рідини або визначальне рівняння є неньютонівським [49].

Дослідження реологічних властивостей емульсій було проведено з використанням реометра Anton Paar MCR302 з вимірювальною системою циліндр в циліндрі CC 27. Свіже приготована емульсія з температурою 40°C поміщалась в зовнішній циліндр реометра. Для визначення кривих в'язкості використовувались наступні параметри прилада: кількість знятих показів приладу 190, швидкість зсуву 0,1 – 100 1/s, температура вимірювання 40 ± 0.1 °C. Дослід повторювався 3 рази для кожної емульсії, після чого обраховували середнє значення.

*Мікроструктура емульсій* емульсій досліджувалась за допомогою мікроскопу Leica DM6 B. Мікроскопія проводилась у світловому полі з використанням програмного забезпечення LAS X Navigator Software і лінз x5, x10, x20. Всі зразки досліджувались одразу після приготування.

#### *Дослідження реологічних властивостей тіста*

Реологія - це міждисциплінарна наука, що вивчає течію і деформацію речовини. Дві крайності реологічної поведінки - це ідеальна пружна поведінка та ідеальна в'язка поведінка. Більшість харчових продуктів, в тому числі і тісто для печива, не можна класифікувати як суто еластичні або в'язкі;

вони є в'язкопружними, оскільки демонструють проміжну поведінку між цими двома крайнощами [49].

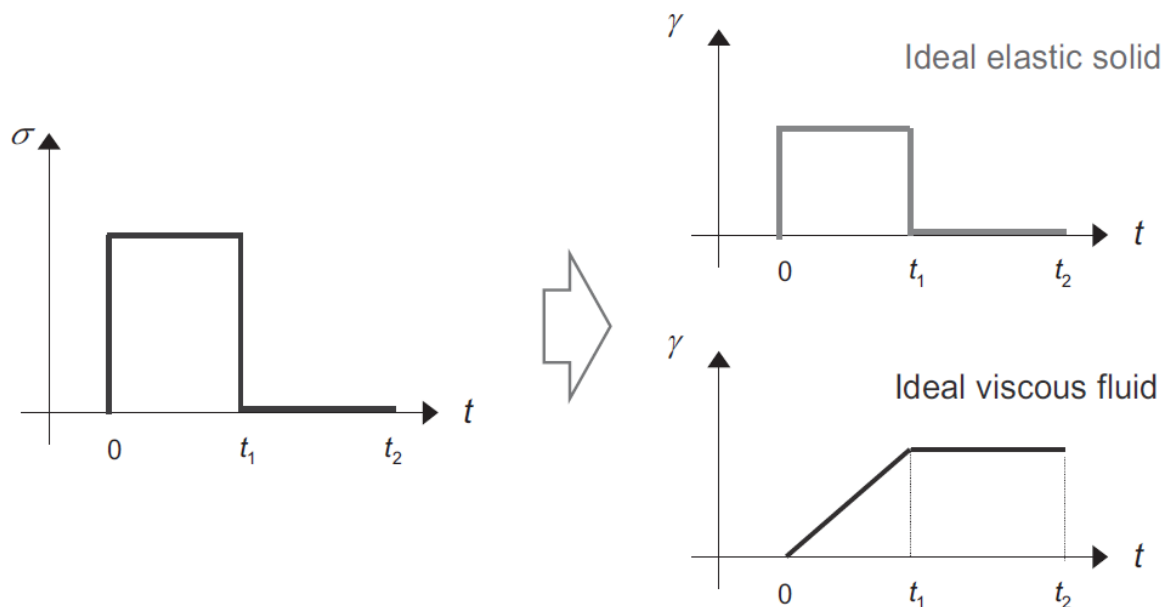
Ідеальна пружна поведінка характерна для твердих речовин і відповідає закону Гука, який стверджує, що деформація прямо пропорційна прикладеній силі. У цьому випадку деформація відбувається миттєво і змінюється на протилежну, коли сила знімається, тому не відбувається розсіювання енергії, тобто енергія деформації зберігається (рис. 2.3.1). У дослідженнях на зсув цей закон виражається наступним чином:

$$\sigma = G \cdot \gamma \quad (2.3.3)$$

де  $G$  - модуль зсуву;

$\gamma$  - деформація зсуву або деформация зсуву;

$\sigma$  - напруження зсуву



**Рис. 2.3.1. Реакція ідеального твердого тіла та ідеальної в'язкої рідини, коли напруження зсуву прикладається протягом часу  $t_1$ , а потім знімається.**

В'язка поведінка характерна для рідин, які течуть під дією прикладенні зовнішньої сили. У цьому випадку деформація зростає до тих пір, поки сила підтримується, і залишається на максимальному значенні, яке досягається коли сила знімається, тобто відбувається розсіювання енергії за рахунок

внутрішнього тертя (рис. 2.3.1). Ідеальні рідини описані вище і підпорядковуються закону Ньютона [49].

У малоамплітудних осциляційних зсувних дослідженнях (від. англ. small amplitude oscillatory shear – SAOS) зразки піддаються деформації, яка гармонійно змінюється в часі.

$$\gamma = \gamma_0 \sin \omega t \quad (2.3.4)$$

де  $\gamma_0$  - амплітуда (максимальна деформація);

$\omega$  - кутова частота.

Для в'язкопружних матеріалів напруження буде представляти затримку або фазовий зсув,  $\delta$ , званий кутом втрат, який змінюється в межах від 0 до 90 градусів; тому в загальному випадку коливальне напруження може бути записане як [49, 88]

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (2.3.5)$$

При математичному перетворенні рівняння ми отримуємо наступне:

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t) \cos \delta + \sigma_0 \cos(\omega t) \sin \delta \quad (2.3.6)$$

Модулі  $G'$  та  $G''$  виражаються наступним чином

$$G' = \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0}\right) \cos \delta \quad (2.3.7)$$

$$G'' = \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0}\right) \sin \delta \quad (2.3.8)$$

Рівняння напруження зсуву можна записати як комбінацію реакцій твердого тіла та рідини

$$\sigma = G' \gamma + \left(\frac{G''}{\omega}\right) \dot{\gamma} = G' \gamma_0 \sin(\omega t) + G'' \gamma_0 \cos(\omega t) \quad (2.3.9)$$

$G'$  називається модулем пружності, оскільки він пов'язаний з твердою, пружною поведінкою, а отже, з енергією, що зберігається у процесі. В ідеальному твердому тілі цей модуль збігається з  $G$ , модулем зсуву.  $G''$  називається модулем втрат, оскільки він пов'язаний з рідиною, в'язкою поведінкою, при якій відбувається розсіювання енергії. Для ньютонівської в'язкої рідини  $G''$  пов'язаний з в'язкістю матеріалу, оскільки він дорівнює  $\omega \eta$  [49].

*Малоамплітудне осциляційне зсувне дослідження низькобілкових тістових систем (від англ. SAOS – Small Amplitude Oscillatory Shear) проводили методом частотної розгортки (від. англ. Frequency sweep) за допомогою реометра Anton Paar MCR702 з вимірювальною системою плита-плита з зубчастою поверхнею PP 25, з зазором (товщиною зразка) 2 мм. Частотну розгортку проводили діапазоном частот від 0,1 до 100 Гц при постійній деформації 0,1%.*

*Дослідження комплексної в'язкості низькобілкових тістових систем*

Для розрахунку комплексної в'язкості спочатку було розпаровано комплексний модуль  $G^*$  [49]

$$G^* = G' + G'' \quad (2.3.10)$$

Комплексна в'язкість була розрахована за наступною формулою

$$\eta^* = G^*(\omega)/\omega \quad (2.3.11)$$

*Дослідження реологічних властивостей низькобілкових тістових систем за допомогою альвеограм проводили на приладі ALVEO-CONSISTOGRAPH NG (АЛЬВЕО-КОНСИСТОГРАФ NG) (CHOPIN Technologies, Франція).*

Спочатку було вирішено проводити дослідження за стандартною методикою описаною вище. Замість борошно було використано суміш всіх сипких рецептурних компонентів (крохмаль, мальтодекстрин, структуроутворювачі). Як контрольний зразок було використано борошно пшеничне вищого сорту. Без жирового компоненту формування тіста не відбувалось, тому було прийнято рішення замішувати низькобілкове тісто окремо, а потім використовувати його для досліджень на альвеографі.

*Дослідження деформації повзучості та відновлення низькобілкових тістових мас* проводили за допомогою реометра Anton Paar MCR702 з вимірювальною системою плита-плита з зубчастою поверхнею PP 25, з зазором (товщиною зразка) 2 мм. Вимірювання проводилось при

прикладанні постійної сили 50 Па протягом 230 секунд, та після зняття сили протягом наступних 860 сек.

### 2.3.2 Методи дослідження процесу термооброблення

*Оптимізацію* процесу термооброблення проводили шляхом двохфакторного експерименту [164].

*Зміна геометричних розмірів тістових заготовок під час випікання*

Тістові заготовки (ТЗ) було відформовані діаметром 50 мм, висотою 5 мм, та випікались випікали протягом 10 хв за температури 220°C. Зміну геометричних розмірів тістової заготовки під час випікання та сушіння визначали шляхом вимірювання діаметра та висоти сформованої тістової заготовки та висоти заготовки на кожній хвилині теплової обробки.

*Термічний аналіз*

Для того, щоб дослідження вважалось термоаналітичним, необхідно виділити три критерії: воно повинно вимірювати фізичну властивість речовини, результат вимірювання повинен бути виражений як функція температури, і дослідження повинно виконуватися за контрольованою температурною програмою [47]. Для дослідження процесу термооброблення низькобілкового печива було використано ряд термоаналітичних методів (табл. 2.3.1).

**Таблиця 2.3.1 – Основні відмінності між термоаналітичними методами застосованими для дослідження низькобілкових тістових мас.**

| Термоаналітичний метод                          | Абревіатура | Вимірювання/ спостереження | Отримані результати                        |
|---|-------------|----------------------------|--|
| Термогравіметрія або Термогравіметричний аналіз | ТГ або ТГА  | Вимірювання зміни маси     | Зміна маси як функція часу або температури |

|                                       |     |  |   |
|---------------------------------------|-----|--|---|
| Диференціальний термічний аналіз      | ДТА | Вимірювання температури між зразком і еталоном       | Зміна температури відносно еталонного матеріалу як функція часу або температури                         |
| Диференційна сканувальна калориметрія | ДСК | Вимірювання теплового потоку між зразком та еталоном | Зміна енергії/ ентальпії відносно еталонного матеріалу як функція часу або температури (тепловий потік) |

*Термогравіметричний аналіз* проводили на Derivatograph Q1500 (Угорщина), температура нагріву 20-240°C, маса зразка в діапазоні 60-75 мг, загальний час термообробки 35 хвилин [35, 47].

*Диференційну скануючу калориметрію* проводили на приладі Mettler Toledo DSC 3+ (Швейцарія). Калібрування приладу проводили за допомогою індію. Для вимірювання використовували алюмінієві посудини з кришками. Порожня герметична посудина використовувалася як еталон. Вимірювання проводили в діапазоні температур 0-240°C з використанням газу азоту, зі швидкістю підвищення температури 5°C за хвилину [47, 131]. Зміну ентальпії ( $\Delta H$ ) розраховували шляхом інтегрування площі під отриманими кривими за допомогою програмного забезпечення STAR.

### **2.3.3 Методи дослідження готових виробів**

*Органолептичні показники готових виробів* проводили згідно ДСТУ *Міцність* визначали за допомогою прилада Строганової [139].

*Намокаємість* визначали шляхом занурення наважки досліджуваного зразку у воду з подальшим зважуванням [139].

*Масову частку вологи* визначали шляхом висушування наважки печива в сушильній шафі СЕШ-3М [139].

*Кількість фенілаланіну* визначали розрахунковим методом на основі вмісту загального нітрогену в досліджуваних зразках. Для вимірювання загального нітрогену використали метод каталітично-термічного розкладання/хемілюмінесценції при 720 °С. Дослідження було проведено за допомогою приладу Shimadzu TOC with TNM-L з використанням автоматичного пробовідбірника. Для визначення вмісту білку загальний нітроген було перераховано за коефіцієнтом конверсії нітрогену в білок для пшеничного борошна 5.7 [56].

### **Висновки до розділу 2**

1. Обрано та охарактеризовано об'єкт та предмет досліджень
2. Розроблено блок-схему досліджень з удосконалення технологій низько білкового печива
3. Підібрано та описано методики досліджень напівфабрикатів та готової продукції.

## **РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ РЕЦЕПТУРНОГО СКЛАДУ НИЗЬКОБІЛКОВОГО ПЕЧИВА.**

### **3.1 Особливості розроблення рецептур низькобілкового печива**

Розроблення рецептурних композицій низькобілкового печива потребує особливого підходу. Враховуючи вимоги до харчування хворих на фенілкетонурію, застосування низькобілкової рецептурної композиції неможливо, або вони можуть бути застосовані в незначній кількості. Меланж, який сприяє утворенню структури і органолептичних властивостей виробів, внаслідок великої кількості фенілаланіну (711 мг/100г) застосовувати не доцільно. Борошно пшеничне також містить велику кількість фенілаланіну (в/с 500 мг/100г, І с – 580 мг/100г). Інші види борошна, наприклад рисове, містить меншу кількість фенілаланіну, однак таке борошно не має клейковинних білків і у меншому ступені сприяє утворенню необхідної структури тіста та виробів [31]. З цією метою можуть бути застосовані кукурудзяний, картопляний, рисовий, тапіоковий та пшеничний крохмаль. Вибираючи вид крохмалю потрібно брати до уваги його функціонально-технологічні властивості та вміст білка. До функціонально-технологічних властивостей крохмалю відноситься здатність до набухання, вологопоглинальна та вологоутримуюча здатності, структуроутворюючі властивості та температура клейстеризації. Ці властивості будуть мати вплив на формування структури тіста та готового низькобілкового печива. Як відомо в крохмалі може бути до 1% білка, що є недоцільним для застосування в низькобілковому печиві. Потрібно віддавати перевагу крохмалю з низьким вмістом білка до 0,4% або високоочищеним безбілковим крохмалю з метою максимально знизити вміст фенілаланіну в готових виробах. У разі застосування пшеничного крохмалю варто віддавати перевагу високоочищеним безглютеновим крохмалю, оскільки низькобілкові продукти також споживаються хворими на фенілкетонурію.

У технології печива в якості основної сировини зазвичай використовують борошно пшеничне, однак у виробництві низькобілкового печива в традиційній кількості його використовувати не можна. В такому виді «борошняних» кондитерських виробів вся кількість борошна може бути замінена на крохмалі.

Оскільки для низькобілкового печива не можливе застосування пшеничного борошна, яйцепродуктів в традиційних кількостях, постає завдання вибору структуроутворювачів, що забезпечують максимально можливе наближення структури тіста та низькобілкового печива до відповідних характеристик традиційних виробів.

В роботі Дорохович В.В. [142] запропоновано рецептуру низькобілкового печива з застосуванням кукурудзяного крохмалю, кількість пшеничного борошна 3,4% до маси всіх рецептурних інгредієнтів. Для покращення утворення структури тіста та виробів 50% цукру білого кристалічного замінено на патоку. Застосування такого рішення сприяло тому, що тісто набувало певною мірою необхідних структурних властивостей. В той же час консистенція тіста значною мірою відрізнялась від консистенції тіста традиційного здобного печива, що ускладнює процес формування виробів (особливо механізованим способом), структура готових виробів також потребує покращення.

З урахуванням вищезазначеного постає необхідність підбору структуроутворювачів, які сприятимуть наближенню структури тіста та низькобілкового печива до структури тіста і готових виробів традиційного рецептурного складу. Це надасть можливість механізованого виробництва низькобілкового печива.

З урахуванням вищезазначеного в дисертаційній роботі проведено декілька блоків (етапів) досліджень з розроблення рецептурного складу низькобілкового печива.

### **3.2 Розроблення рецептур низькобілкового печива з застосуванням пшеничного борошна в обмеженій кількості**

На першому етапі досліджень в рецептурному складі низькобілкового печива застосовували пшеничне борошно у кількості 3,6% до маси всіх рецептурних компонентів. В традиційному здобному печиві кількість пшеничного борошна становить до 55% до маси всіх рецептурних компонентів. З метою зменшення кількості фенілаланіну рецептурну кількість борошна радикально зменшено. Основним за кількістю рецептурним компонентом був картопляний крохмаль. Також в рецептурному складі було застосовано патоку, як заміну частини цукру та структуроутворювачі камідь гуару, ксантану та карбоксиметилцелюлозу у різному співвідношенні. Рецептури наведено в таблиці 3.1.

На першому етапі досліджень застосовували картопляний крохмаль, пшеничне борошно у кількості 3,6% до маси всіх рецептурних компонентів (для зменшення кількості фенілаланіну кількість борошна зменшено), патоку, як заміну частини цукру та структуроутворювачі камідь гуару, ксантану та карбоксиметилцелюлозу у різному співвідношенні. Рецептури наведено в таблиці 3.1.

**Таблиця 3.1 – співвідношення сировини у дослідних зразках низькобілкового печива з різним вмістом структуроутворювачів**

| Найменування сировини | Витрати сировини (кг) за рецептурами |       |       |       |       |
|-----------------------|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                       | 1.1                                  | 1.2   | 1.3   | 1.4   | 1.5   |
| Крохмаль картопляний  | 50,00                                | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 |
| Борошно вищий сорт    | 4,00                                 | 4,00  | 4,00  | 4,00  | 4,00  |
| Патока                | 35,00                                | 35,00 | 35,00 | 35,00 | 35,00 |
| Вершкове масло        | 23,00                                | 23,00 | 23,00 | 23,00 | 23,00 |

|                         |      |      |      |      |      |
|-------------------------|------|------|------|------|------|
| Камедь                  | 0,10 | 0,40 | 0,40 | 1,00 | 1,00 |
| Карбокси-метилцеллюлоза | 0,10 | 0,40 | 1,00 | 0,40 | 1,00 |
| Ванільна пудра          | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| Сода                    | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| Амоній                  | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |

Тісто виготовлене за запропонованими рецептурами відрізняється за консистенцією. Також є відмінності в зміні геометричних розмірів тістових заготовок під час термооброблення (випікання-сушіння) та органолептичних показниках випеченого печива.

Рецептура 1.1. Тісто не пластичне, консистенція м'яка, розріджена. Тістові заготовки під час термооброблення дуже розпливаються. Діаметр тістових заготовок збільшується на 42%, збільшення висоти не відбувається. На поверхні виробів тріщини, в середині печива утворюються порожнини. Такий результат може бути пов'язаний зі зменшенням кількості пшеничного борошна та недостатньою кількістю структуроутворювачів.

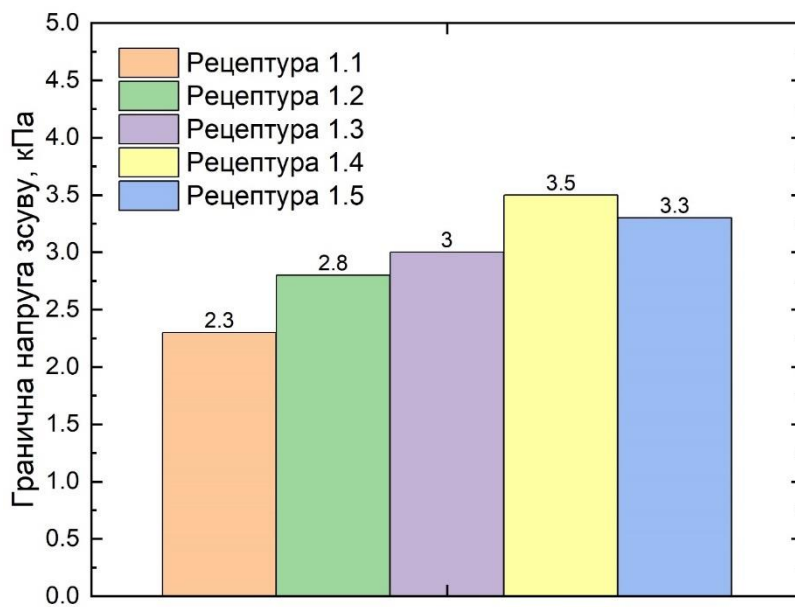
Рецептура 1.2. Тісто більш пластичне. Тістові заготовки менше розпливаються при термообробленні. Діаметр тістових заготовок збільшується на 32...34%, висота виробів збільшується на 10...12%. На поверхні печива також наявні тріщини, а в середині порожнини.

Рецептура 1.3. Тісто набуває ще більше пластичних властивостей. Діаметр тістових заготовок під час термооброблення збільшується на 28%, висота на 15%. Поверхня виробів без тріщин, рівномірно забарвлена. Порожнини в середині виробів відсутні, вироби мають розсипчасту структуру.

Рецептура 1.4. Тісто пластичне. Діаметр тістових заготовок під час термооброблення збільшується на 19%, висота на 22%. В той же час в готових виробах наявні темні вкраплення, що обумовлено недостатнім набуханням структуроутворювачів та специфічним присмаком камеді гуара.

Рецептура 1.5. Тісто пластичне. Діаметр тістових заготовок під час термооброблення збільшується на 23% висота на 16%. На поверхні виробів також спостерігаються темні вкраплення.

З метою кількісного визначення структурних властивостей тістових мас низькобілкового печива, розробленого у першому блоці досліджень, було визначено ГНЗ (рис. 3.1).



**Рис. 3.1 Гранична напруга низькобілкового тіста виготовленого за рецептурами першого блоку досліджень.**

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що ГНЗ досліджуваних тістових мас значно відрізняється. Якщо ГНЗ тістової маси виготовленої за рецептури 1.1. прийняти за 100% то ГНЗ тістової маси за рецептурою 1.2. буде 122%, рецептурою 1.3. – 130%, рецептурою 1.4. – 152%, рецептурою 1.5. – 143%. Збільшення кількості структуроутворювачів в рецептурах 1.1 –1.4. спричиняє підвищення ГНЗ. В той же час максимальний вміст структуроутворювачів в рецептурі 1.5., а ГНЗ дещо менша ніж в тісті за рецептурою 1.4. Це можна пояснити тим, що в тістовій масі недостатньо вологи для набухання всієї кількості структуроутворювачів, тобто частина

структуруювачів «не працює». Про це свідчить і наявність на поверхні випеченого печива більших краплень темних краплень не набухлих структуруювачів.

За результатами першого блоку досліджень з розроблення рецептурних композицій можна зробити висновки, що в рецептурах 1.1 та 1.2 недостатня кількість структуруювачів, внаслідок чого тісто не має необхідних пластичних властивостей, тістові заготовки розпливаються під час термооброблення, печиво не має привабливого та характерного для даного типу виробів стану поверхні.

В рецептурних композиціях 1.4 та 1.5 надлишкова кількість структуруювачів, що погіршує органолептичні показники низькобілкового печива.

Печиво виготовлене за рецептурною композицією 1.3 має найбільш прийнятні органолептичні показники, а тісто має необхідні пластичні властивості.

### **3.3 Розроблення рецептур низькобілкового печива без застосування пшеничного борошна**

Оскільки при розробці низькобілкового печива доцільно максимально зменшити вміст білка, в наступному блоці досліджень нами було прийнято рішення під час розробки рецептур відмовитись від використання борошна пшеничного. Також постало питання доцільності застосування патоки.

В другому блоці (етапі) досліджень патоку було вилучено з рецептурних композицій. В якості структуруювачів застосовано камедь ксантана та карбоксиметилцелюлозу. В низці рецептур як структуруювач додатково введено мальтодекстрин. Застосування мальтодекстрину, порівняно з патокою, спрощує технологічний процес. Картопляний крохмаль було замінено на кукурудзяний, оскільки він має вищу температуру клейстеризації, що позитивно впливає на якість готових

виробів. Рецептури розроблених зразків низькобілкового печива наведено в таблиці 3.2.

**Таблиця 3.2 – Рецептурні композиції блоку досліджень 2**

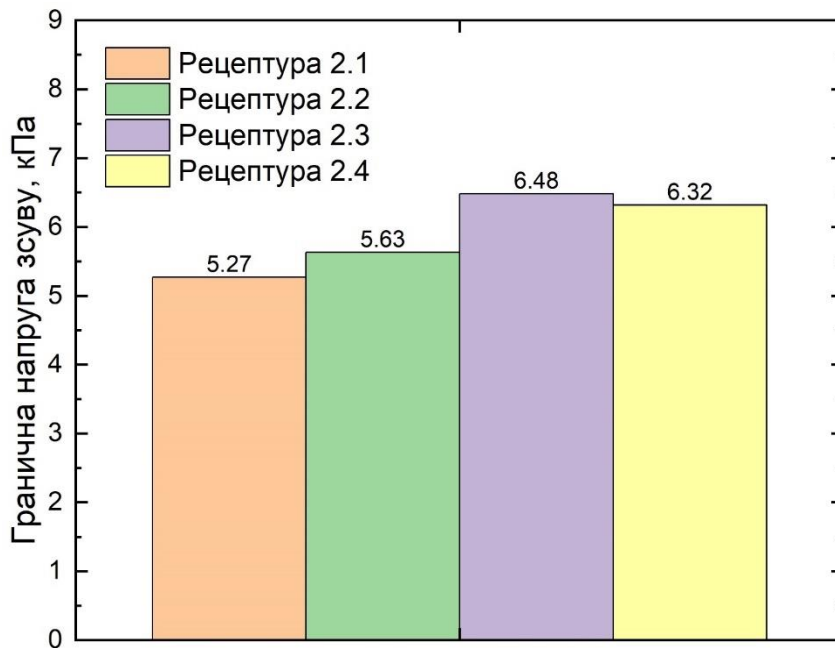
| Найменування сировини | Витрати сировини (кг) за рецептурами |     |     |     |
|-----------------------|--------------------------------------|-----|-----|-----|
|                       | 2.1                                  | 2.2 | 2.3 | 2.4 |
| Крохмаль кукурудзяний | 100                                  | 100 | 100 | 100 |
| Масло вершкове        | 45                                   | 45  | 45  | 45  |
| Цукор білий           | 20                                   | 20  | 20  | 20  |
| Мальтодекстрин        | 20                                   | -   | -   | -   |
| Камедь ксантана       | 0,2                                  | -   | 0,2 | 0,1 |
| Карбоксиметилцелюлоза | -                                    | 0,2 | -   | 0,1 |
| Сода харчова          | 0,2                                  | 0,2 | 0,2 | 0,2 |

Тістові маси виготовлені за рецептурами 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 мали необхідні пластичні властивості, що дає можливість їх формуванню. Під час термооброблення збільшення діаметра виробів на 19...22%, висоти на 11...19%. В той же час у печиві виготовленому за рецептурами 2,2 і 2,4 спостерігалась нерівномірна пористість. Печиво виготовлене за рецептурами 2,1 та 2,3 мало рівномірну пористість, явного присмаку структуроутворювачів не відчувалось.

ГНЗ тістових мас низькобілкового печива, що виготовлено за наведеними рецептурами відрізняється (рис. 3.2).

Тістова маса, що виготовлено за рецептурою 2.1 має найнижчу ГНЗ. Таким чином ми бачимо, що внесення мальтодекстрину в рецептуру тіста розріджувати тісто. ГНЗ тістової маси виготовленої за рецептури 2.4. більше за ГНЗ тістової маси рецептури 2.1 на 20%. Це пов'язано з синергічною дією камеді ксантану і карбоксиметилцеллюлози. Збільшення ГНЗ у зразках тіста виготовленого за рецептурою 2.2, порівняно з ГНЗ тіста

виготовленого за рецептурою 2.1., пов'язано з водопоглинальною здатністю карбоксиметилцеллюлози.



**Рис. 3.2** Гранична напруга низькобілкового тіста виготовленого за рецептурами другого блоку досліджень.

Тістова маса, що виготовлено за рецептурою 2.1 має найнижчу ГНЗ. Таким чином ми бачимо, що внесення мальтодекстрину в рецептуру тіста розріджувати тісто. ГНЗ тістової маси виготовленої за рецептури 2.4. більше за ГНЗ тістової маси

рецептури 2.1 на 20%. Це пов'язано з синергічною дією камеді ксантану і карбоксиметилцеллюлози. Збільшення ГНЗ у зразках тіста виготовленого за рецептурою 2.2, порівняно з ГНЗ тіста виготовленого за рецептурою 2.1., пов'язано з водопоглинальною здатністю карбоксиметилцеллюлози.

Досліджувані зразки печива виготовлені за рецептурами 2,1 і 2,3 характеризуються добре розвиненою пористістю. Намокаємість печива виготовленого за рецептурою 2,1 становить 192%, а за рецептурою 2,3 – 135%.

В той же час, у печиві виготовленому за запропонованими рецептурами відчувається присмак кукурудзяного крохмалю, консистенція тіста більш тверда, порівняно зі зразками розробленими у першому блоці досліджень, про що свідчать результати визначення ГНЗ та органолептичні (тактильні) відчуття.

### 3.4 Удосконалення рецептурного складу низькобілкового печива шляхом застосування тапіокового крохмалю

Тому в третьому блоці досліджень кукурудзяний крохмаль було частково замінено на тапіоковий крохмаль. Вибір тапіокового крохмалю обумовлений тим, що він має загущуючі, вологоутримуючі властивості та позитивно впливає на сенсорні властивості виробів.

В таблиці 3 наведено рецептурні композиції з різним співвідношенням кукурудзяного і тапіокового крохмалю.

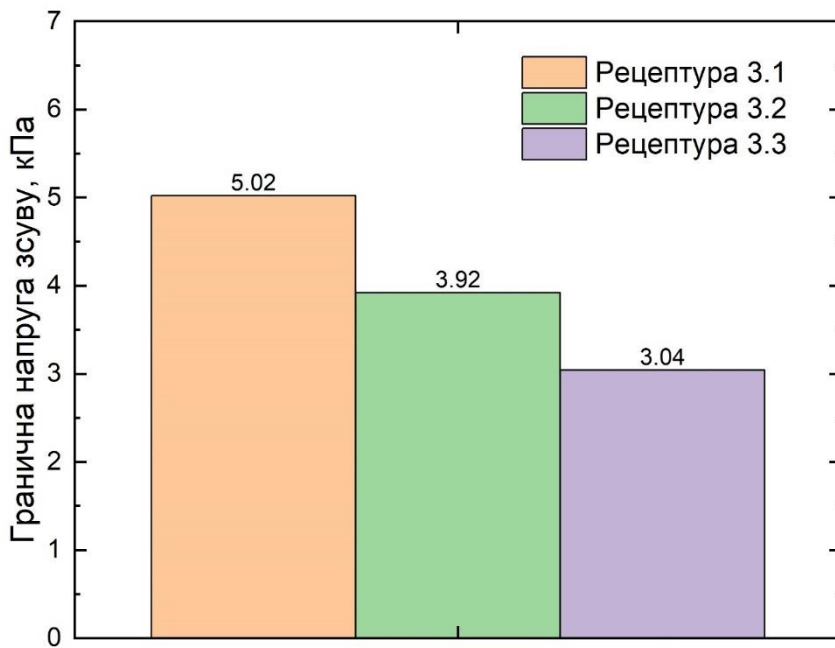
**Таблиця 3.3 – Рецептурні композиції третього блоку досліджень.**

| Найменування сировини | Витрати сировини (кг) за рецептурами |     |     |
|-----------------------|--------------------------------------|-----|-----|
|                       | 3.1                                  | 3.2 | 3.3 |
| Крохмаль кукурудзяний | 95                                   | 80  | 65  |
| Крохмаль тапіоковий   | 5                                    | 20  | 35  |
| Масло вершкове        | 45                                   | 46  | 45  |
| Цукор білий           | 20                                   | 20  | 20  |
| Мальтодекстрин        | 20                                   | 20  | 20  |
| Камедь ксантана       | 0,2                                  | 0,2 | 0,2 |
| Сода харчова          | 0,2                                  | 0,2 | 0,2 |

Тістові маси виготовлені за наведеними рецептурними композиціями мають гарні структурні показники ніж тістові маси в попередніх блоках досліджень, а готові вироби кращі органолептичні показники. Відмічено зменшення величини ГНЗ порівняно з ГНЗ тістових мас з 2-го блоку досліджень. Значення ГНЗ представлено на рис. 3.3.

Тісто виготовлене за рецептурою 3.1 пластичне, і за консистенцією схоже на тісто виготовлене за рецептурною композицією 2.1. Гранична напруга такого тіста нижча на 5%, а готові вироби збільшуються в діаметрі на 5% порівняно з виробами виготовленими рецептурною композицією 2.1. Відчувається присмак кукурудзяного крохмалю.

Тісто виготовлене за рецептурною композицією 3.2 пластичніше за тісто виготовлене за рецептурою 3.1, а ГНЗ нижче на 22%. Готові вироби збільшилися в діаметрі порівняно з виробами виготовленими рецептурою 2.1 на 1.38%. Готові вироби мають кращі смакові властивості без присмаків крохмалю.



**Рис. 3.3** Гранична напруга низькобілкового тіста виготовленого за рецептурами третього блоку досліджень.

Тісто виготовлене за рецептурною композицією 3.3 розріджене порівняно з тістовими масами виготовленими за рецептурними композиціями 3.1 і 3.2, гранична напруга нижча, відповідно, на 40% та 23%, а готові вироби збільшилися в діаметрі під час випікання на 22%

порівняно з виробами виготовленими за рецептурною композицією 2.1. Готові вироби не мають присмаку крохмалю, але є дуже розсипчатими і легко ламаються.

Таким чином ми бачимо, що додавання тапіокового крохмалю знижує ГНЗ низькобілкових тістових мас, позитивно впливає на пластичні властивості тіста, та покращує смакові властивості виробів. Вироби виготовлені за рецептурною композицією 3.2 мають найкращі органолептичні показники з третього блоку досліджень.

Взаємодія рецептурних компонентів між собою в низькобілкових тістових масах, та перетворення, що відбуваються під час технологічного процесу, не достатньо досліджені, та потребують додаткових досліджень. Тому для подальших досліджень було обрано рецептури 2,1, 2,3 та 3,2, оскільки вони мають найнижчий вміст білка, та найвищу якість готових виробів.

### 3.5 Удосконалення рецептурного складу низькобілкового печива на основі розрахунку моделі ідеального продукту

Для нормального функціонування організму людини з раціоном харчування мають надходити всі основні нутрієнти, зокрема фізіологічно-функціональні речовини.

За методикою проф. Дорохович А.М. розроблено модель ідеального продукту для дітей що страждають на фенілкетонурію віком 1 і 10 років. На основі розробленої моделі ідеального продукту пораховано відповідність розроблених рецептур до моделі ідеального продукту (табл. 3.4)

**Таблиця 3.4 – Модель ідеального продукту та для дітей що страждають на фенілкетонурію віком 1 і 10 років та відповідність розроблених рецептур цій моделі.**

|                 | Модель ідеального продукту, для дітей віком |       | Відповідність у %, рецептура 1 для дітей віком |        | Відповідність у %, рецептура 2 для дітей віком |        | Відповідність у %, рецептура 3 для дітей віком |        |
|-----------------|---|-------|--|--------|--|--------|--|--------|
|                 | 10 років                                    | 1 рік | 10 років                                       | 1 рік  | 10 років                                       | 1 рік  | 10 років                                       | 1 рік  |
| <i>Рівень 1</i> |   |       |  |        |  |        |  |        |
| Білки           | 1,22  | 1,98  | 31,08  | 19,15  | 25,08  | 15,46  | 27,03  | 16,65  |
| Жири            | 19  | 18,5  | 129,83   | 133,34 | 115,03   | 118,14 | 111,17   | 114,17 |
| Вуглеводи       | 79,8  | 79,8  | 91,23  | 91,23  | 93,81  | 93,81  | 94,43  | 94,43  |
| <i>Рівень 2</i> |   |       |  |        |  |        |  |        |
| ФА              | 72,7  | 72,7  | 21,96  | 12,3   | 17,39  | 10,54  | 19,15  | 11,60  |
| АК без ФА       | 1127  | 1860  | 40,33  | 24,43  | 31,77  | 19,25  | 35,20  | 21,33  |

|                         |      |      |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------|------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| НЖК                     | 6,33 | 6,03 | 215,99 | 226,74 | 191,40 | 200,92 | 184,93 | 194,13 |
| ПНЖК                    | 6,33 | 6,03 | 12,19  | 12,80  | 10,76  | 11,29  | 10,44  | 10,96  |
| МНЖК                    | 6,33 | 6,03 | 80,18  | 84,17  | 21,03  | 74,56  | 68,65  | 72,07  |
| ди і моносахариди       | 19,9 | 59,9 | 66,30  | 66,30  | 58,73  | 58,73  | 58,70  | 58,70  |
| полісахариди            | 19,9 | 59,9 | 99,52  | 99,52  | 88,70  | 88,70  | 106,3  | 106,3  |
| <i>Рівень 3</i>         |      |      |        |        |        |        |        |        |
| Омега3                  | 0,47 | 0,74 | 21,49  | 14,23  | 19,04  | 12,61  | 18,40  | 12,18  |
| Омега6                  | 1,41 | 2,13 | 43,79  | 28,99  | 38,61  | 25,56  | 37,53  | 24,84  |
| Замінні ПНЖК            | 4,45 | 3,25 | 1,19   | 1,63   | 1,06   | 1,45   | 1,02   | 1,40   |
| Розчинні полісахариди   | 48   | 51   | 150,45 | 141,60 | 155,1  | 145,98 | 155,91 | 146,74 |
| Нерозчинні полісахариди | 11,1 | 8,9  | 5,28   | 6,59   | 3,75   | 4,67   | 4,68   | 5,84   |

Аналізуючи рецептурний склад запропонованих видів низькобілкового печива і його відповідність моделі ідеального продукту можна зробити висновок щодо необхідності його удосконалення шляхом застосування фізіологічно-функціональних інгредієнтів.

В четвертому блоці досліджень запропоновано частину (20%) вершкового масла замінити на кукурудзяну олію, яка має в своєму складі значну кількість поліненасичених жирних кислот. Замішування тіста для розроблених найменувань печива проводиться з використанням води. Доцільним є замість води використовувати пюре, зокрема моркв'яне пюре, яке містить значну кількість β-каротину. З метою покращення показників печива запропоновано використовувати корицю мелену. Рецептури наведено в таблиці 3.5

**Таблиця 3.5 – Рецептурні композиції четвертого блоку досліджень.**

| Найменування сировини              | Назва печива        |          |           |         |           |
|------------------------------------|---------------------|----------|-----------|---------|-----------|
|                                    | Шоколад-на фантазія | Новинка  | Жовтеньке | Тік-так | Топініжка |
| Крохмаль кукурудзяний нативний     | 54,0                | 44,0     | 50,0      | 50,0    | 40,0      |
| Крохмаль кукурудзяний резисцентний | -                   | 8,8      | -         | -       |           |
| Борошно пшеничне 1 с               | 13,0                | 13,5     | 13,5      | -       |           |
| Крохмаль топіоковий                |                     |          |           |         | 10,0      |
| Мальтодекстрин                     | -                   | -        | -         | 15,0    | 15,0      |
| Камідь ксантана                    | -                   | -        | -         | 0,2     | 0,2       |
| Масло вершкове                     | 30,0                | 20,0     | 20,0      | 20,0    | 20,0      |
| Олія кукурудзяна                   | -                   | 5,0      | 5,0       | 5,0     | 5,0       |
| Цукор білий                        | 12,0                | 16,0     | 18,0      | 17,0    | 16,0      |
| Пюре морквяне                      | -                   | -        | 22,0      | -       |           |
| Какао порошок                      | 4,0                 | -        | -         | -       | -         |
| Ванільна пудра                     | 0,26                | 0,26/0,3 | 0,26/0,3  | -       |           |
| Кориця мелена                      | -                   | -        | -         | 0,3     | 0,3       |
| Сода                               | 0,16                | 0,16     | 0,16      | 0,16    | 0,16      |
| Амоній                             | 0,16                | 0,16     | 0,16      | 0,16    | 0,16      |
| ВИХІД                              | 100                 | 100      | 100       | 100     | 100       |

Всі рецептури 4 блоку досліджень мали високу якість і хороші органолептичні показники (детальний опис в розділі 5).

Оскільки саме крохмалі та гідроколоїди формують структуру тіста і готових виробів, важливо детально дослідити їх вплив на низькобілкові тістові системи та готові вироби. Для цього краще використовувати рецептурні композиціями з блоків досліджень 1,2 і 3, оскільки вони містять меншу кількість інгредієнтів, і таким чином легше ідентифікувати вплив кожного окремого інгредієнта на систему. Аналізуючи результати

досліджень можна зробити висновок, що кращі структурні показники тіста та органолептичні показники готових виробів має низькобілкове печиво виготовлене за рецептурними композиціями 2.1, 2.3 та 3.2.

Для розроблення раціональних технологій низькобілкового печива потрібно провести дослідження з вибору та обґрунтування способу приготування тіста, встановлення та обґрунтування оптимальних параметрів термооброблення, визначення якісних показників готових виробів.

### **Висновки до розділу 3**

1. Проведено 4 етапи розробки низькобілкового печива з застосуванням кукурудзяного, картопляного та тапіокового крохмалів та структуроутворювачів карбоксиметилцелюлози, камеді ксантану та гуару.

2. Визначено ГНЗ всіх розроблених зразків низькобілкового тіста, зміни геометричних розмірів печива в процесі випікання-сушіння та органолептичні показники готових низькобілкових виробів. Збільшення кількості структуроутворювачів зменшує розтікання тістових заготовок під час випікання та збільшує ГНЗ тіста. Використання мальтодекстрину та тапіокового крохмалю збільшує розтікання тістових заготовок під час випікання та зменшує ГНЗ тіста.

3. Розраховано модель ідеального продукту для дітей віком 1 рік та 10 років, та розроблено 5 рецептур на основі моделі ідеального продукту.

4. На основі моделі ідеального продукту розроблено 5 рецептур низькобілкового печива з покращеним нутрієнтним складом, з застосуванням кукурудзяної олії, морквяного пюре, резистентного крохмалю.

5. З метою дослідження впливу основних рецептурних компонентів на перебіг технологічного процесу та формування необхідної структури низькобілкових виробів було прийнято рішення для подальшого досліджування використовувати рецептури розроблені у 1-3 блоках

досліджень. Найкращі структурні показники тіста та органолептичні показники готових виробів має низькобілкове печиво виготовлене за рецептурними композиціями 2.1, 2.3 та 3.2, тому ці рецептури було обрано для подальших досліджень.

## **РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ТІСТОПРИГОТУВАННЯ НИЗЬКОБІЛКОВОГО ПЕЧИВА**

### **4.1 Особливості технології приготування печива**

Традиційне печиво за класифікацією поділяється на три основні групи: цукрове, здобне і зтяжне. Здобне печиво має коагуляційно-кристалічну структуру [138]. За своїм рецептурним складом розроблене низькобілкове печиво схоже на здобне, оскільки воно містить викосу кількість жиру, і саме жир, а не вода виступає пластифікатором тістових мас.

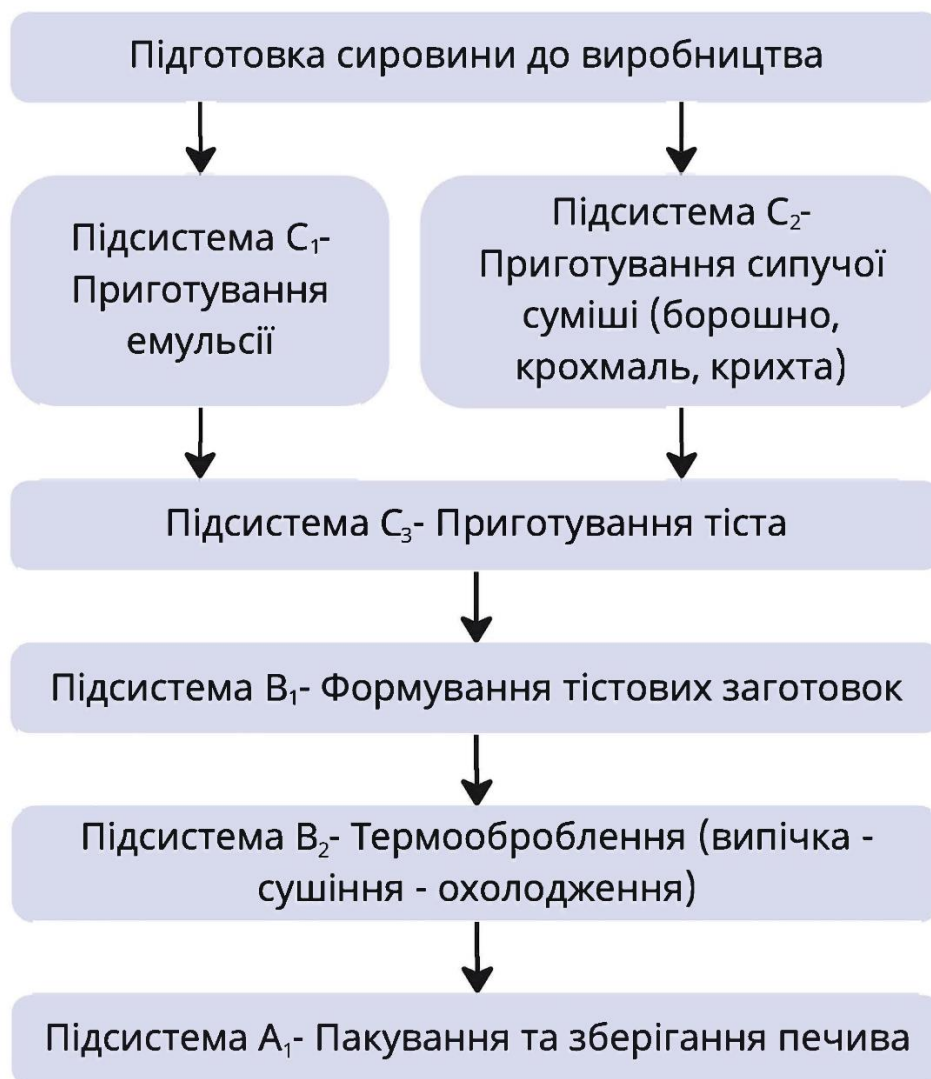
За способом формування тіста здобне печиво поділяється на дві групи: пісочне виємне та пісочне відсадне [138].

Структуру та вологість тіста визначає співвідношення сировини. Замість тіста для традиційного здобного печива може здійснюватися двома способами. Перший спосіб – заміс тіста здійснюється в одній універсальній машині таким чином: спочатку перемішують всю сировину за винятком меланжу і борошна, потім у процесі замішування додають за два прийоми меланж і воду (за необхідності) перемішують 3-4 хв і в останню чергу – борошно, перемішують ще 5-8 хв. Другий спосіб – це заміс тіста здійснюється у дві стадії: приготування емульсії і основний заміс тіста [138]. У розроблених рецептурах низькобілкового печива відсутні яйцепродукти, які в технології борошняних кондитерських виробів відіграють роль емульсифікаторів, крім цього, нами було прийняте рішення не використовувати додаткові поверхнево активні речовини для покращення якості емульсії, тому для виробництва розроблених низькобілкових виробів доцільно використовувати метод приготування тіста на емульсії.

Процес виробництва печива доцільно розглядати з позиції системного аналізу. Система – це впорядкована певним чином множина різноманітних елементів, що взаємопов'язані між собою, які утворюють деяку єдність, властивості якої більше суми властивостей елементів з яких вона складається. Систему не можливо дослідити, якщо розглядати властивості

окремих елементів. Для системи головним є спосіб взаємодії елементів, які відображені в її структурі.

Таким чином процес виробництва печива являється великою технологічною системою. Оскільки розроблене низькобілкове печиво схоже за деякими показниками на традиційне здобне пісочне виємне печиво, для подальшої роботи ми використовували систему розроблену проф. Дорохович А.М. та проф. Дорохович В.В. (рис. 4.1.1).



**Рис. 4.1.1 – Виробництво здобного пісочного печива як велика технологічна система [138].**

Розроблене низькобілкове печиво суттєво відрізняється від традиційного печива в першу чергу через принципово інший рецептурний склад, тому і кожна підсистема в технології низькобілкового печива має свої

особливості і відмінності порівняно з підсистемами здобного, зтяжного, або цукрового печива.

#### **4.2 Дослідження емульсій для приготування низькобілкового печива**

Підсистема С1 – приготування емульсій має важливе значення для досягнення високої якості низькобілкового тіста.

За визначенням, емульсія - це дисперсія крапель однієї незмішуваної речовини в іншій. Емульсія може бути жир у воді, наприклад, молоко, в якому краплі жиру дисперговані в безперервній водній фазі. Це також може бути емульсія вода в жирі, в якій водна фаза диспергована в суцільній масляній фазі (наприклад, маргарин). Навіть проста піна, в якій повітря дисперговане в безперервній рідкій фазі, може бути класифікована як емульсія [95].

Утворення емульсії вимагає двох процесів: По-перше, незмішувана фаза повинна бути диспергована на дрібні однорідні краплі. Зазвичай це досягається за допомогою механічної енергії. Утворення дрібних крапель незмішуваної фази призводить до значного збільшення міжфазної поверхні. Це термодинамічно нестабільна система, і існує сильна тенденція до злиття крапель, що в кінцевому підсумку призводить до повного розділення фаз. Новостворена міжфазна область стабілізується поверхнево-активними речовинами, які в харчовій промисловості зазвичай називають емульгаторами [95].

Поверхнево-активні речовини або емульгатори - це матеріали, які складаються з молекул, що володіють подвійною розчинністю в межах однієї молекули. Це можливо завдяки тому, що молекули складаються з гідрофільної та гідрофобної частин [123].

Існує два основних типи поверхнево-активних речовин, які використовуються у виробництві борошняних кондитерських виробів: ті, що отримані на основі ліпідів, і ті, що на основі білків. Функціональність цих

матеріалів базується на наявності поверхнево-активних ліпопротеїдів і фосфоліпідів [109]. Оскільки споживання фенілаланіну і білків суттєво обмежено в дієті при фенілкетонурії, використання поверхнево-активних речовин на основі білків не є доцільним. Нами було прийнято рішення прагнути до «clean label» і не використовувати емульгатори для стабілізації емульсій для приготування низькобілкового тіста. У харчовій промисловості цей термін використовується для харчових продуктів, які виготовлені без додавання не натуральних інгредієнтів та поліпшувачів.

Емульсія не може бути створена без застосування механічної енергії. Під час приготування емульсії для тіста частина повітря захоплюється та вводиться в рідину. Емульсії та піни термодинамічно нестабільні, і за відсутності адекватної стабілізації це лише питання часу, коли дисперсна фаза відокремиться від безперервної фази [95]. Єдиний варіант, який мають технологи харчової промисловості, - це уповільнити швидкість, з якою різні процеси дестабілізують піну та емульсії. Це досягається, до певної міри, використанням поверхнево-активних речовин або емульгаторів.

Тісто для печива, виготовлене на основі жиру або олії, також являє собою класичну емульсійну систему жиру, розчиненого в безперервній водній фазі. У поєднанні з цим існує система піни, яка спочатку знаходиться в жировій фазі, але переходить у водну фазу, коли жир плавиться під час випікання, в результаті чого утворюється складна емульсійна і пінна система. Таким чином необхідно досягти однорідної емульсії у підсистемі С1 з дрібними краплинами диспергованої фази для того щоб створити сприятливі умови для подальшого утворення низькобілкової тістової системи. Було продемонстровано, що повітряні клітини в жировій частці коагулюють всередині жирової частки, а не переходять у водну фазу як дискретні повітряні клітини [102]. У тій же публікації було помічено, що бульбашки повітря, які вивільняються з жирової фази під час плавлення, залишаються прикріпленими до поверхні жиру, що свідчить про те, що

поверхня жиру може бути покрита яечними білками або доданими емульгаторами під час перемішування, які передаються бульбашкам газу, коли вони переходять з жиру у водну фазу. Нагрівання тіста під час випікання викликає швидке розширення бульбашок. У цей момент в'язкопружні властивості плівок, що оточують газові комірки, стають важливими для підтримання цілісності бульбашок. Розширення припиняється, коли встановлюється структура виробів і дискретні пінні системи розпадаються, утворюючи відкриту сітчасту структуру.

Властивості емульсій відіграють суттєву роль у технології печива, тому дослідження реологічних і мікроструктурних властивостей емульсій для низькобілкового тіста має важливе значення. Вченими проведено багато базових досліджень емульсій [95, 123], проте на сьогоднішній день існує лише кілька досліджень присвячених низькобілковим виробам, таким чином існує велика прогалина у дослідженнях, та потреба у додаткових розробках низькобілкових кондитерських виробів і дослідженнях низькобілкових напівфабрикатів, зокрема емульсій.

Нами було досліджено емульсії для 4 рецептур низькобілкового печива. Оскільки емульсії для рецептур з етапів розробки рецептур 1...3 мають майже однаковий рецептурний склад, дослідження емульсій для рецептур, що були розроблені на четвертому етапі розробки рецептур є більш актуальним, завдяки можливості дослідити вплив різних рецептурних компонентів емульсій на реологічні і мікроструктурні показники емульсій. Досліджувані рецептури наведено у таблиці 4.2.1.

**Таблиця 4.2.1 – Рецептурні компоненти емульсій низькобілкового печива.**

| Назва сировини   | Капітошка | Новинка | Жовтеньке | Тік-Так |
|------------------|-----------|---------|-----------|---------|
| Цукор            | +         | +       | +         | +       |
| Масло вершкове   | +         | +       | +         | +       |
| Олія кукурудзяна | -         | +       | +         | +       |

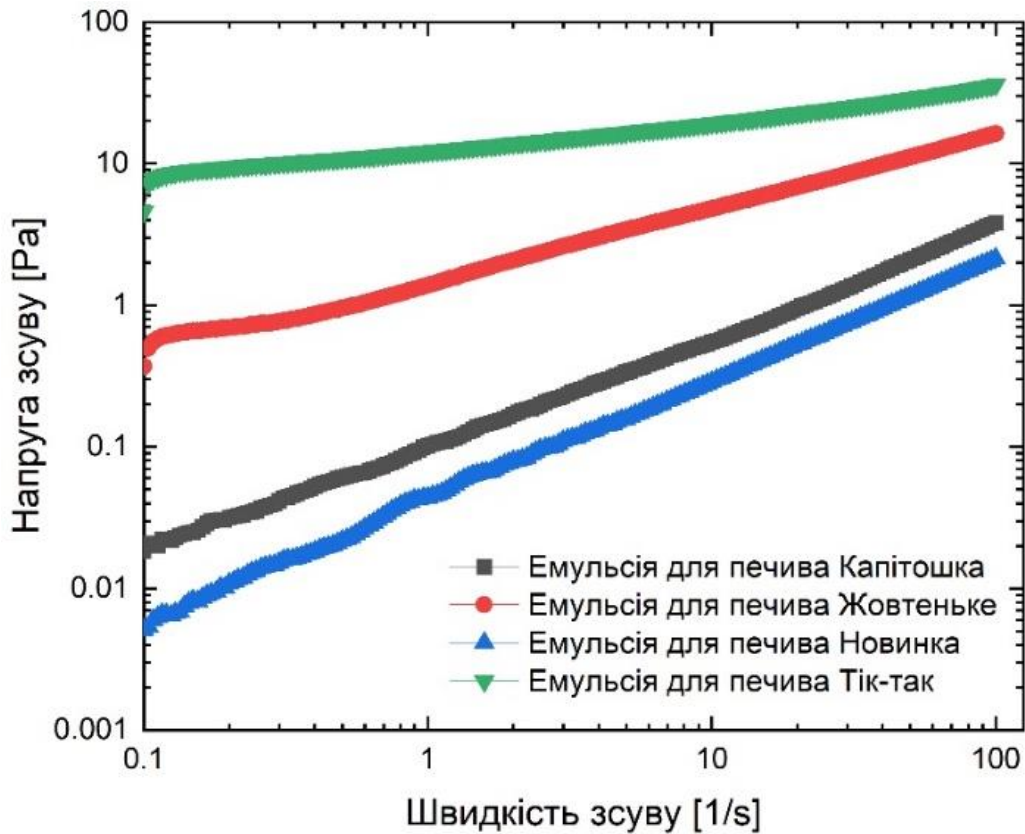
|                 |   |   |   |   |
|-----------------|---|---|---|---|
| Моркв'яне пюре  | - | - | + | - |
| Камідь ксантана | - | - | - | + |
| Вода            | + | + | + | + |

Оскільки досліджувані рецептури мають різний рецептури склад вони мають і різні реологічні властивості, зокрема різні криві течії та в'язкості.

Ми проводили вимірювання в'язкості за температури 40°C оскільки така температура часто використовується при приготуванні емульсій для печива. Знаючи реологічні властивості емульсії для печива можна підібрати оптимальне обладнання для її приготування та для та оптимізувати процес перекачування емульсії з емульгатора в тістомісильну машину.

Важливе значення при технологічному процесі має поведінка рідини при зсуві, тобто чи змінюються реологічні властивості рідини під час прикладання зсуву. Неньютонівська рідина - це рідина, яка не відповідає закону Ньютона, тобто залежність її напруги зсуву від швидкості зсуву не є лінійною. Таких рідин існує дуже багато. В'язкість ньютонівської рідини є константою. Однак в'язкість неньютонівської рідини - це не константа, а нелінійна функція, яка описує залежність між напругою зсуву і швидкістю зсуву. Ця функція називається визначальним рівнянням, і визначальне рівняння ньютонівської рідини є константою.

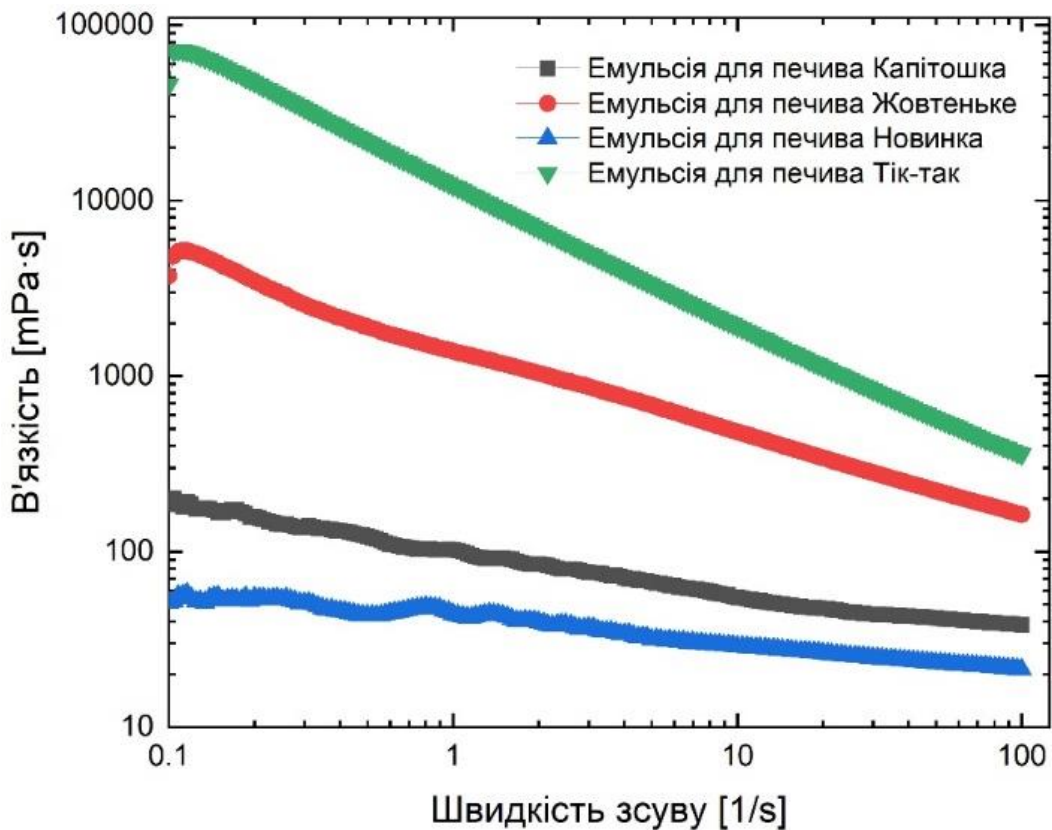
Для побудови кривих в'язкості і кривих течії (рис. 4.2.1, 4.2.2) досліджуваних емульсій було використано ротаційний реометр з вимірювальною системою циліндр в циліндрі. Один з циліндрів з'єднаний з двигуном зі змінною швидкістю, а рідина, яку потрібно виміряти, знаходиться в зазорі між циліндрами. Коли циліндр обертається, в рідині створюється градієнт швидкості, і крутний момент який вимірюється і передається на прилад [55].



**Рис. 4.2.1 – Криві течії досліджуваних емульсій для приготування низькобілкового печива.**

Всі зразки емульсій для низькобілкового печива показують схожу поведінку при зміні швидкості зсуву: при збільшенні швидкості зсуву, напруга необхідна для зсуву продукту збільшується. За кривими течії видно, що для зсуву різних емульсій для низькобілкового печива потрібна різна напруга зсуву. Це можна пояснити різним рецептурним складом емульсій [155].

Для більш детального опису поведінки рідини при зсуві, крім кривих течії, доцільно також розглядати криві в'язкості (рис. 4.2.2).



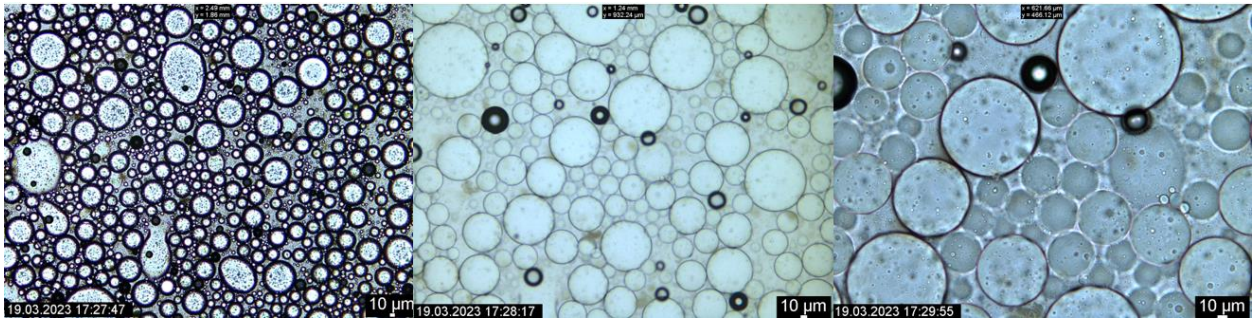
**Рис. 4.2.2 – Криві в'язкості досліджуваних емульсій для приготування низькобілкового печива.**

За побудованими кривими в'язкості і течій ми бачимо, що всі досліджувані емульсії є неньютонівськими рідинами і мають виражену поведінку зсувного потоншення (розрідження при зсуві). Таким чином, ми можемо віднести досліджувані емульсії для низькобілкового до псевдопластичних рідин. В'язкість цих рідин зменшується зі збільшенням швидкості зсуву [155].

Емульсія для печива Тік-Так має найбільшу в'язкість. Це можна пояснити наявністю в складі рецептури камеді ксантану. Цей гідроколоїд володіє сильно вираженими загущуючими властивостями та здатен суттєво підвищувати в'язкість. Рецептури емульсій для печива Капітошка і Новинка майже однакові, проте у печиві Новинка частина вершкового масла замінена кукурудзяною олією. Оскільки емульсія для печива Новинка має нижчу в'язкість, ми можемо зробити висновок, що така заміна знижує в'язкість

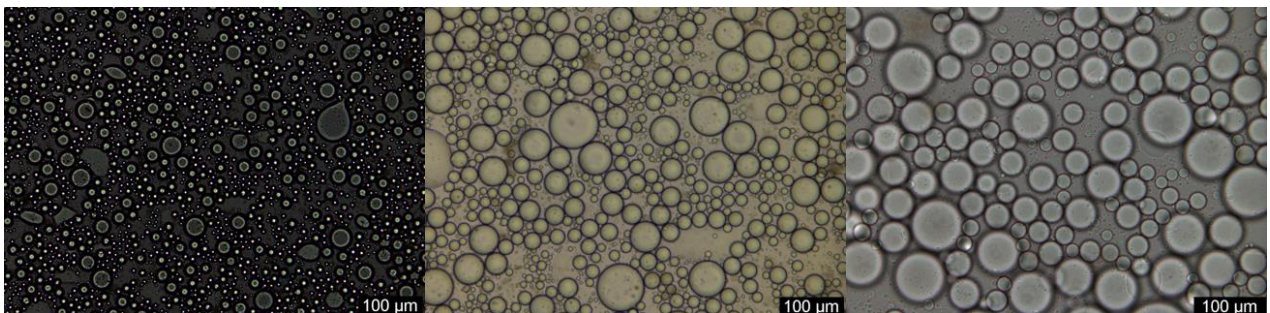
системи. Додавання моркв'яного пюре (емульсія для печива Жовтеньке) здатне збільшити в'язкість емульсії [155].

Для кращого розуміння властивостей досліджуваних емульсій варто приділити увагу мікроструктурі емульсій (рис. 4.2.3 – 4.2.6)



**Рис. 4.2.3 – Мікроструктура емульсії для печива Капітошка**

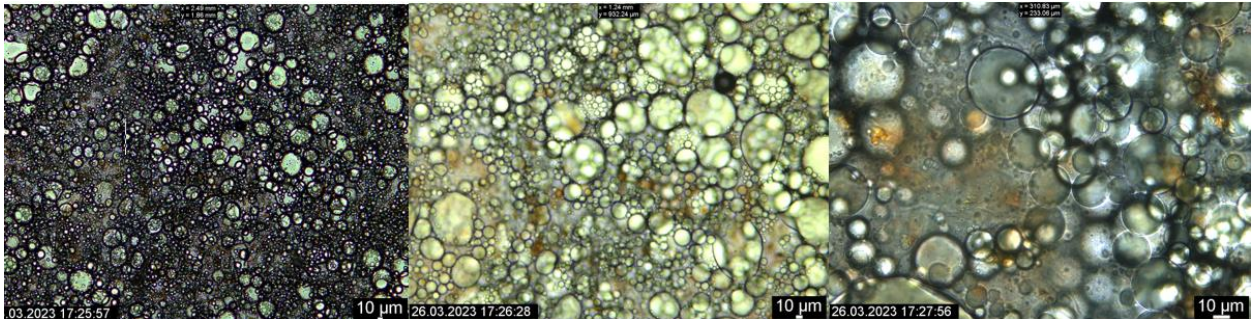
На знімках зроблених за допомогою мікроскопу видно, що розмір бульбачок жиру, що розподілений у водній фазі не однорідний. Це можна пояснити високою енергією поверхневого натягу, за рахунок якої бульбашки жиру схильні з'єднуватись між собою утворюючи більші за розміром.



**Рис. 4.2.4 – Мікроструктура емульсії для печива Новинка**

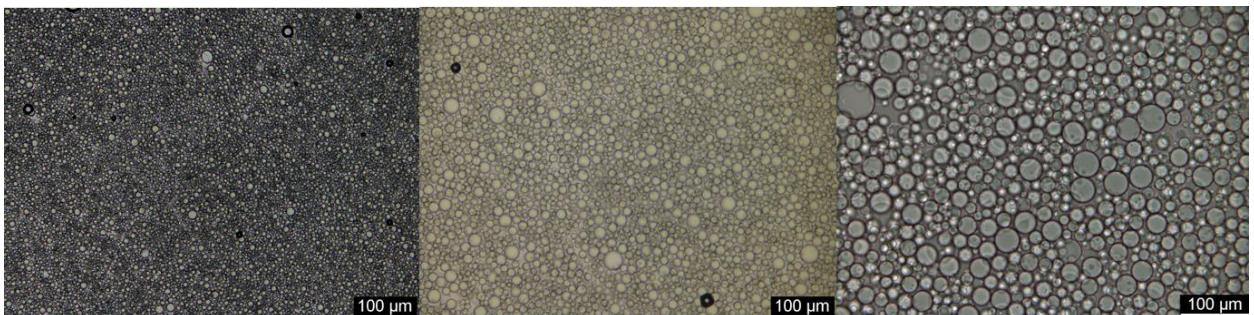
Емульсія для печива Новинка виглядає більш однорідною, порівняно з емульсією для печива Капітошка. Це можна пояснити заміною частини вершкового масла кукурудзяною олією. Вірогідно, що бульбашки жиру мають меншу енергію поверхневого натягу, і тому залишаються у вигляді дрібніших бульбашок. Нижча в'язкість емульсії для печива Новинка також може бути пояснена меншим розміром частинок емульсії менший,

вірогідніше за рахунок цього для того, щоб зсунути таку емульсію необхідно прикласти менше сили.



**Рис. 4.2.5 – Мікроструктура емульсії для печива Жовтеньке**

На знімках мікроструктури емульсії для печива Жовтеньке чітко видно вкраплення морквяного пюре. У хімічному складі пюре міститься клітковина, яка здатна збільшувати в'язкість емульсії. Варто зазначити, що емульсія виглядає не гомогенною, розмір бульбашок жиру не однорідний.



**Рис. 4.2.6 – Мікроструктура емульсії для печива Тік-Так**

Мікроструктура емульсій для печива Тік-Так виглядає найбільш однорідною. Краплинки жиру суттєво менші порівняно з попередньо дослідженими емульсіями, їх розмір більш однорідний і вони рівномірно розподілені в об'ємі досліджуваної емульсії. Це пояснюється наявністю у рецептурі камеді ксантану [155].

Як зазначено раніше, розмір краплинок жиру в різних зразках емульсій не однорідний (табл. 4.2.2).

**Таблиця 4.2.2 – Розмір краплинок жиру в низькобілкових емульсіях.**

|   | Капітошка | Новинка | Жовтеньке | Тік-Так |
|---|-----------|---------|-----------|---------|
| Розмір краплинок диспергованої фази, мк | 10-160    | 6-100   | 4-100     | 10-50   |

Під час проведення реологічного вимірювання досліджувана речовина реагує на певну деформацію. Деформація створюється шляхом прикладання сили до матеріалу і, таким чином, призводить до деформації та/або течії матеріалу. Під дією деформації при високій швидкості зсуву великі бульбашки жиру можуть розбиватись на кілька менших, про що свідчить зменшення в'язкості досліджуваних зразків при збільшенні швидкості зсуву (рис. 4.1). Величина цієї деформації та/або течії пов'язана з фізико-хімічними властивостями матеріалу. Конституційні макроскопічні властивості емульсії впливають на співвідношення між напруженням і деформацією і залежать від складу, міжфазних взаємодій, а також мікроскопічної структури і розміру крапель.

Ще одне явище, що може відбуватись під дією деформації у емульсіях є зміна форми бульбашок жиру у напрямі руху вимірювальної системи реометра. За рахунок цього опір рідини зменшується що призводить до зменшення в'язкості.

Ключовими фізичними явищами, важливими для стабільності емульсії, є розшарування (або седиментація), коагуляція і коалесценція крапель дисперсної фази. Розшарування відбувається через різницю в густині між жировою та водною фазами. Різниця між двома фазами повинна бути якомога меншою, щоб сприяти підтримці рівномірної дисперсності дисперсної фракції. Процес коалесценції є дещо складнішим. Коалесценція ініціюється краплинною коагуляцією, яка супроводжується витісненням

міжфазного матеріалу з області контакту крапель. Оскільки емульсії для печива Капітошка і Новинка не містять у своєму складі поверхнево-активні речовини, ми можемо зробити припущення що вони схильні до коалесценції, оскільки краплинки жиру мають високий поверхневий натяг, і тому мають тенденцію з'єднуватись між собою витісняючи цим самим воду. Очікується, що витіснення матеріалу буде легшим у розширеній плівці, ніж у щільно упакованій плівці. Таким чином, ми бачимо, що емульсія для печива Тік-Так є найбільш стабільної, оскільки наявність камеді ксантану в складі емульсії призводить до утворення щільно упакованої/ конденсованої плівки на межі розділу фаз. Оскільки нами було прийняте рішення не вводити до рецептурного складу додаткові емульгатори, доцільно збільшити інтенсивність збивання емульсії для приготування низькобілкового тіста.

#### **4.3 Дослідження реологічних властивостей тіста**

Реологічні властивості тіста відіграють важливу роль у технологічному процесі виробництва печива та у формуванні структури готових виробів. У технології низькобілкового печива необхідно досягти таких реологічних властивостей напівфабрикатів, при яких вироби можна буде виробляти на існуючій промисловій лінії для виробництва традиційних виробів. Таким чином виробникам буде легше впровадити розроблені вироби у виробництво, оскільки це не вимагатиме додаткових інвестицій в устаткування та досліджень направлених на розроблення й удосконалення обладнання.

Оскільки низькобілкове печиво не містить у своєму складі білки, які зазвичай відповідають за формування пружно-пластичного тіста, досягнення необхідних реологічних властивостей низькобілкового тіста досягається за допомогою використання інших низькобілкових компонентів, за допомогою яких можна змоделювати властивості клейковини. На сьогодні існують дослідження безглютенових тістових мас для різних груп хлібобулочних та борошняних кондитерських виробів [4, 19, 33, 53], проте

дослідження низькобілкових тістових мас відсутні. Враховуючи це доцільно досліджувати низькобілкові маси з мінімальним вмістом білка, для кращого розуміння взаємодії молекул жиру з гідроколоїдами низькобілкових мас що були розроблені на етапі розробки рецептур 2 і 3. Для виробництва тіста за цими рецептурами використовується емульсія ідентична до емульсії для печива «Тік-Так». Враховуючі органолептичні показники готових виробів та ГНЗ тістових мас для подальших реологічних досліджень нами було обрано рецептури 2.1, 2.3 та 3.2.

Модуль пружності,  $G$ , і в'язкість,  $\eta$ , надають інформацію про пружну і в'язку реакцію тіста, відповідно, оскільки їх значення визначають величину деформації або швидкість зсуву, що виникає при прикладенні напруги зсуву. Механічні моделі, що представляють ці ідеальні поведінки, складаються з пружності для пружного твердого тіла і пластичності для в'язких матеріалів [9].

Як зазначалося раніше, реальні матеріали є в'язкопружними і мають одночасно в'язкі та пружні властивості, тому для характеристики їхньої поведінки необхідно використовувати інші реологічні властивості. У таких випадках механічні моделі, що описують пружинні і пластичні властивості можуть слугувати для візуалізації в'язкопружної поведінки тіста. Модель Максвелла включає в себе пружину і пластичну поведінку, з'єднані послідовно, в той час як модель Кельвіна-Фойгта розглядає паралельну асоціацію [15, 16].

Процес замісу низькобілкового тіста є критично важливим елементом процесу приготування низькобілкового печива, оскільки саме на цьому етапі відбувається змішування та гідратація сипких компонентів, ініціюється утворення бульбашок і починається розвиток структури печива. Процес замісу тіста повністю відповідає за отримання тіста з відповідною структурою і реологічними властивостями для подальшої переробки.

Процес замісу низькобілкового тіста складається з двох окремих процесів: один - гомогенізація різних інгредієнтів тіста, що є справжнім процесом змішування, а інший - розвиток структури тіста за рахунок передачі механічної енергії змішування в систему. Хоча перший процес має важливе значення, він є однаковим для замісу низькобілкового і традиційного тіста. Саме другий процес демонструє унікальність низькобілкового тіста. Коли в тісто вкладається механічна енергія, його опір розтягуванню збільшується, а потім після певної критичної точки знову зменшується.

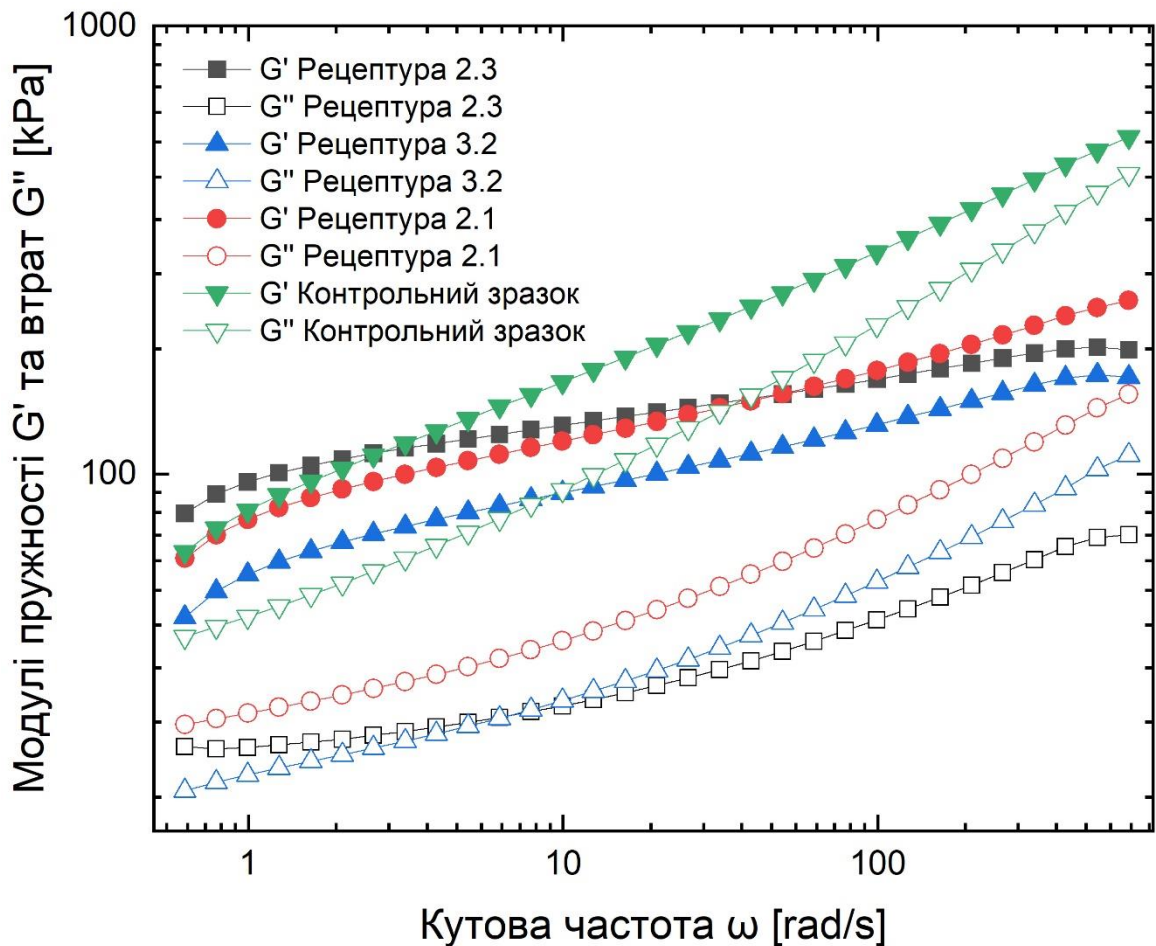
#### **4.3.1 Малоамплітудне осциляційне зсувне дослідження низькобілкових тістових систем**

Для дослідження реологічних властивостей тістових систем широко застосовуються малоамплітудні осциляційні зсувні дослідження та випробування на деформацію повзучості та відновлення.

Основними інгредієнтами низькобілкового тіста є крохмаль, цукор і жир. Якість печива залежить від природи і концентрації інгредієнтів, що використовуються в тісті. Реологічні властивості є одними з найважливіших фізичних властивостей, що визначають поведінку тіста, зокрема, вимірювання в'язкопружних властивостей динамічними методами (SAOS). Напруга, що прикладається до зразка в лінійній в'язкопружній області, є досить низькою, щоб не викликати незворотних змін у структурі; таким чином, отримується інформація про незмінену структуру системи, так що цей тест можна вважати своєрідним відбитком структури тіста. Лінійні в'язкопружні властивості традиційного тіста з використанням пшеничного борошна вивчалися багатьма авторами. Щодо борошна, Балцавіас та ін. [7] оцінювали лінійні в'язкопружні властивості пісочного тіста з різним складом. Вони вивчали вплив заміни борошна нативним крохмалем і спостерігали кількісне зниження модуля в'язкопружності [49]. Щодо ролі сахарози, то вона збільшила рідиноподібні властивості тіста (розріджує

тісто), оскільки сахароза модифікує властивості нежирової фази через вплив на кількість розчинника.

Для визначення реологічних властивостей тіста було проведено частотну розгортку, з діапазоном частот від 0,1 до 100 Гц при постійній при постійній деформації 0,1%.



**Рис. 4.3.1 – Малоамплітудне осциляційне зсувне дослідження низькобілкових тістових систем.**

На рис. 4.3.1 ми бачимо, що при дослідженні модулів пружності та в'язкості (втрат) низькобілкові системи мають схожу динаміку поведінки при зміні кутової частоти. При цьому, контрольний зразок (традиційне тісто для здобного печива виготовлене з використанням борошна пшеничного, вершкового масла, яєць та цукру), при низькій кутовій частоті має модуль пружності в аналогічному діапазоні до низькобілкового тіста. Однак при

збільшенні кутової частоти модуль пружності продовжує суттєво рости порівняно з низькобілковими тістовими системами.

Модулі втрат низькобілкового тіста нижчі за модуль втрат тіста для здобного печива. Традиційне тісто для здобного печива було досліджене багатьма науковцями. Зокрема було досліджено тісто для печива з різним вмістом жирів борошна. Вплив ендогенних ліпідів борошна на структуру здобного пісочного тіста було вивчено за допомогою осциляційних тестів [75]. Використання знежиреного борошна забезпечило вищу в'язкопружність, а мікроструктура знежиреного пісочного печива показала, що білок клейковини був більш гідратованим і розвиненим. Висловлено припущення, що полярні фракції ліпідів утворюють зв'язки з білковими молекулами і допомагають контролювати доступ води до білків [75]. В той же час, у досліджених низькобілкових тістових системах спостерігається інше явище. Високий вміст жирової фази збільшує пластичні властивості тіста виступаючи пластифікатором.

Науковці вивчали вплив часткової заміни борошна резистентним крохмалем, для збагачення неперетравлюваними вуглеводами клітковиною, на в'язко-пружні властивості традиційного бісквітного тіста. Вони отримали вищі значення для  $G'$ , ніж  $G''$ , але обидва модулі показали слабку залежність від частоти, що вказує на слабку гелеву структуру. Крім того, при збільшенні вмісту стійкого крохмалю спостерігалось збільшення обох модулів. Хоча заміна борошна вплинула на значення  $G'$  і  $G''$ , профілі  $\tan \delta$  були подібними, що свідчить про відсутність структурних змін [52]. Оскільки модулі досліджених низькобілкових зразків повільно змінюються зі збільшенням частоти ми можемо зробити висновок що їм також притаманні властивості гелів.

Подібні результати були отримані [84]. Вони вивчали вплив додавання волокна псилію на реологічні властивості бісквітного тіста і виявили, що  $G'$  завжди вищий за  $G''$ , а вищі значення  $G'$  і  $G''$ , отримані для рецептур з

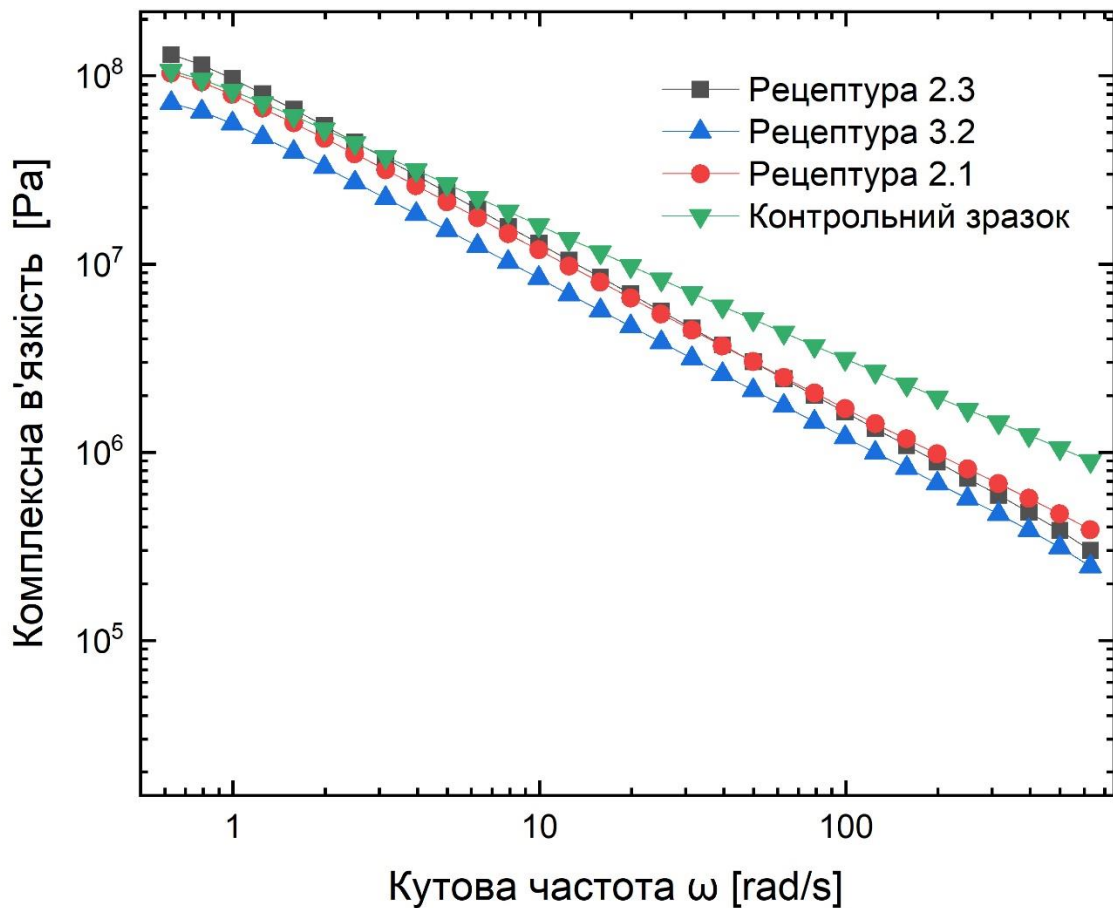
більшим вмістом борошна і псилію. Вони дійшли висновку, що є два фактори, які можуть сприяти більш високому ступеню структури тіста: високий вміст білка, який сприяє утворенню клейковини, і високий вміст розчинної клітковини, яка сприяє встановленню взаємодії між білками і полісахаридами [84]. Це твердження корелюється з отриманими результатами та підтверджує припущення щодо гелеподібної структури низькобілкових тістових мас за рахунок відсутності білків. В той же час вплив клітковини на низькобілкові тістові системи залишається не вивченим.

Сахароза конкурує з борошном за доступну воду, пригнічуючи розвиток клейковини [106]. Крім того, вона впливає на консистенцію тіста [108], яка відіграє важливу роль на стадії формування виробів. В низькобілкових системах сахароза може конкурувати за воду з гідроколоїдами, крохмалями та мальтодекстрином. В такому випадку міцність та еластичність тіста буде залежати від співвідношення рецептурних компонентів та їх здатності поглинати воду. Проведеним малоамплітудним осциляційним зсувним дослідженням ми можемо підтвердити що мальтодекстрин має схожий вплив на тістову систему як сахароза, оскільки модулі втрат тістових систем виготовлених за рецептурами 2.1 та 3.2 (з застосуванням мальтодекстрину) вищі, за модуль втрат тістової системи виготовленої за рецептурою 2.3 (без застосування мальтодекстрину). Збільшення  $G$  при заміні або зниженні вмісту сахарози порівняно з тістом без сахарози вказує на підвищення міцності тіста [52]. Таку підвищену пластичність зразків зі зниженим вмістом мальтодекстрину можна пояснити більш вираженим набуханням крохмальних зерен в цих зразках, що узгоджується з [76], які стверджують, що набухання полімерів тіста обмежується присутністю цукрів через конкуренцію за воду [77]. Підвищення модуля втрати зразків з мальтодекстрином свідчить про розрідження тіста, таким чином мальтодекстрин знижує міцність тіста.

Низькобілкове тісто виготовлене за рецептурою 3.2 (низькобілкова тістова маса з частковою заміною кукурудзяного крохмалю на тапіоковий). Має найнижчий модуль пружності з усіх досліджених тістових мас. Це можна пояснити специфічною будовою молекул тапіокового крохмалю і розгалуженими ланцюгами амілопектину. При вищій кутовій частоті модуль втрат починає наближатись до модуля пружності, але не перетинає його. Таким чином ми бачимо, що додавання тапіокового крохмалю до складу низькобілкового печива здатне розріджувати тісто.

У всіх досліджених зразках модулі пружності вищі за модулі втрат. Це свідчить про те, що поведінка притаманна твердому тілу є домінуючою над поведінкою притаманною рідинам. У контрольному зразку при високій кутовій частоті модуль втрат починає наближатись до модуля пружності, проте модулі не перетинаються. У випадку, якщо модуль втрат починає переважати над модулем пружності, досліджуваний продукт починає текти. Таким чином, можемо припустити що формування всіх досліджуваних зразків варто проводити виїмним методом. При цьому методі формування виробу матимуть чітку форму, і не будуть розпливатись.

Ще одним показником який можна визначити за допомогою малоамплітудного осциляційного зсувного дослідження є комплексна в'язкість. Комплексна в'язкість  $\eta^*$  є найбільш поширеним параметром і може бути розрахована безпосередньо з комплексного модуля. Ця в'язкість може бути пов'язана з в'язкістю, виміряною при випробуванні на постійний зсув, співвідношенням, відомим як правило Кокса-Мерца [49]. Комплексна в'язкість наближається до кінцевого значення при низьких частотах. Це значення є нульовою в'язкістю зсуву матеріалу. На рис. 4.3.2 наведено комплексну в'язкість досліджуваного низькобілкового тіста, що являє собою загальний опір матеріалу до пливу і виражена як функція кутової частоти.



**Рис. 4.3.2 – Комплексна в'язкість досліджених низькобілкових тістових мас виражена як функція кутової частоти**

Таким чином ми бачимо що всі досліджувані зразки мають схожу поведінку. При збільшенні кутової частоти комплексна в'язкість зменшується тістових мас знижується на логарифмічній шкалі. Значення комплексної в'язкості ще раз підтверджують виражене раніше твердження щодо можливості виготовлення низькобілкового печива на існуючих лініях з виробництва традиційного здобного печива.

#### **4.3.2 Дослідження реологічних властивостей низькобілкових тістових мас за допомогою альвеограм**

Ще одним ефективним методом дослідження реологічних властивостей тіста альвеограми. Зазвичай альвеограф використовується для вимірювання пружно-еластичних властивостей пшеничного борошна. Проте за зміненим протоколом, який описано у розділі 2, можна дослідити і реологічні властивості тіста.

Аналіз проводиться шляхом замісу і подальшої деформації тістозаготовки у вигляді кулі під дією тиску повітря і реєстрації всіх параметрів цієї деформації тіста. Результати альвеограм наведені в таблиці 4.3.1.

**Таблиця 4.3.1 – Дослідження реологічних властивостей низькобілкових тістових систем за допомогою альвеограм.**

|                      | Контрольний зразок | Зразок виготовлений за рецептурою 2.1 | Зразок виготовлений за рецептурою 2.3 | Зразок виготовлений за рецептурою 3.2 |
|----------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Тиск P, mm           | 86                 | 20                                    | 39                                    | 25                                    |
| Індекс розтяжності G | 15,3               | 6,68                                  | 6,3                                   | 11,4                                  |
| Еластичність Ie, %   | 56,3               | 0                                     | 0                                     | 0                                     |
| Відношення P/L       | 1,83               | 2,22                                  | 4,88                                  | 0,96                                  |

Еластичність не притаманна низькобілковим тістовим масам, це пояснюється в першу чергу відсутністю в рецептурному складі клейковинних білків, які б могли надати необхідної структури. Варто зазначити, контрольний зразок має відносно високу еластичність, оскільки в конкретному випадку зразок готувався за стандартною методикою без внесення жирового компоненту, за рахунок не відбувалось обволакування білки борошна жиром, і клейковина мала можливість адсорбувати необхідну кількість води для побудови клейковинного каркасу.

Всі досліджувані зразки підлягають розтяжності, це забезпечить необхідні властивості тістових мас для можливості розкатування тістової маси в пласт для подальшого формування виїмним методом. Зразки тіста виготовлені за рецептурами 2.1 та 2.3 мають майже вдвічі нижчу розтяжність порівняно з контрольним зразком і зразком виготовленим за рецептурою 3.2. Таким чином ми можемо зробити висновок, що наявність мальтодекстрину

в рецептурі низькобілкового тіста майже не змінює розтяжність низькобілкового тіста. Варто зазначити, що тиск необхідний для розриву зразку, до складу якого входить мальтодекстрин (рецептура 2.1) майже в два рази нижчий (20 мм), порівняно з тиском необхідним для розриву зразка тіста без додавання мальтодекстрину (39 мм). Це корелюється з попередньо отриманими результатами модулів пружності і втрат тістових мас і підтверджує твердження, що наявність мальтодекстрину у низькобілкових тістових системах збільшує пластичність тіста.

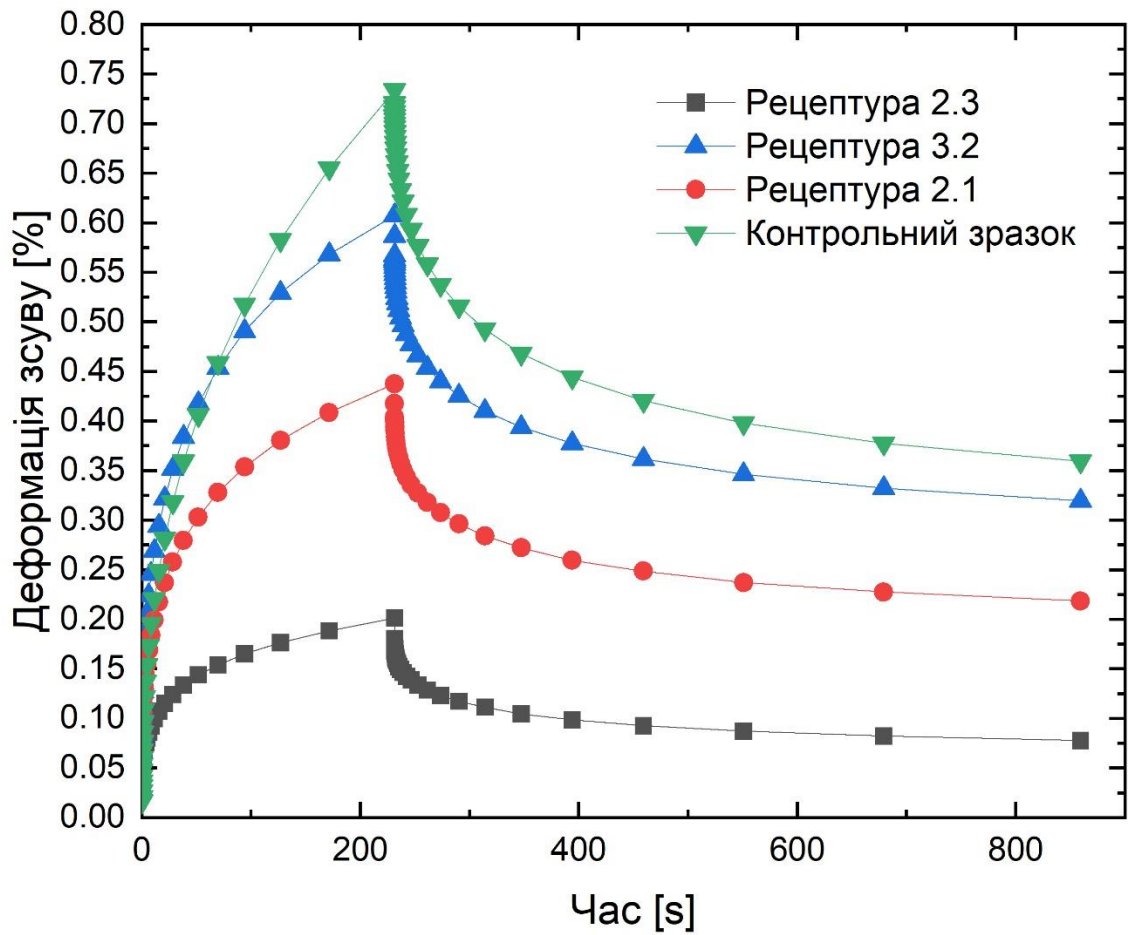
Індекс розтяжності зразка з додаванням тапіокового крохмалю збільшується, і наближається до індексу розтяжності контрольного зразка. Таким чином додавання тапіокового крохмалю до складу низькобілкових тістових мас збільшує розтяжність тіста.

#### **4.3.3 Дослідження деформації повзучості та відновлення низькобілкових тістових мас**

При випробуванні на повзучість миттєве напруження  $\sigma_0$  прикладається до зразка протягом певного часу,  $t_1$ . Після зняття напруги зразку дають розслабитися (випробування на відновлення) і відстежують деформацію зсуву  $\gamma(t)$  протягом ще одного періоду часу,  $t_2$  (рис. 4.2.1). Реальні системи, зокрема тісто, демонструють проміжну реакцію, яка не передбачає ні повної миттєвої деформації, ні повного відновлення. На графіку видно, що тісто для виробництва традиційного здобного печива та низькобілкового з застосуванням мальтодекстрину легше піддаються деформації.

Явище повзучості та відновлення пов'язане з переорієнтацією зв'язків у в'язкопружному матеріалі. Ці випробування часто проводили на тісті безглютеновому тісті з метою вивчення його в'язкопружних властивостей як межах, так і за межами лінійної в'язкопружної області. Деякі автори стверджують, що за межами лінійної в'язкопружної області напруження, яке застосовується, більш схоже на напруження, якому піддаються вироби при

термообробці за рахунок видалення вологи, хімічного розкладання розпушувачів та збільшення виробів в об'ємі [52, 111]. Всі досліджені тістові композиції мають сильно виражені пластичні властивості. При прикладанні постійної сили 50 Па до зразків протягом 230 секунд деформація зсуву всіх досліджуваних зразків збільшується. Після того, як прикладена сила знімається, тістові заготовки починають відновлюватись. Варто зазначити, що повного відновлення не відбувається для жодного з досліджених зразків. У цьому експерименті застосовується постійне напруження, а еволюція деформації з часом оцінюється у фазі повзучості. Коли напруження знімається, у фазі відновлення також реєструють, як зменшується деформація. У випробуваннях на повзучість і відновлення деформація зсуву зазвичай оцінюється з точки зору відповідності або відношення деформація/напруження (Па). У лінійній в'язкопружній області еволюція податливості з часом не залежить від прикладеного напруження. За межами лінійної в'язкопружної області крива повзучості змінюється залежно від обраного напруження [111].



**Рис. 4.3.3 – Графік деформації повзучості та відновлення низькобілкових тістових мас.**

Тісто виготовлене за рецептурою 2.3 деформується найменше при прикладанні сили в 50 Па. Це пов'язано в першу чергу з рецептурним складом тістової маси та міжмолекулярними взаємодіями рецептурних компонентів. В тій системі відсутні білки та мальтодекстрин. Частина води зв'язується сахарозою, найбільша кількість води зв'язується кукурудзяним крохмалем, який завдяки розгалуженій структурі амілопектину утворює міцне тісто, яке важче піддається деформації.

Тісто виготовлене за рецептурою 2.1 легше піддається деформації при сталій нарузі зсуву 50 Па. Таким чином ми можемо зробити висновок що таке тісто м'якше. Цей результат корелюється з даними отриманими під час малоамплітудного осциляційного зсувного дослідження низькобілкових

тістових систем. Пом'якшення тіста відбувається за рахунок додавання мальтодекстрину.

Тісто виготовлене за рецептурою 3.2 деформується сильніше порівняно з тістовими системами виготовленими за рецептурами 2.1 і 2.3. Це пов'язано з тим, що крім додавання мальтодекстрину, в тістовій системі 3.2 частина кукурудзяного крохмалю була замінена на тапіоковий крохмаль. Отриманий результат також корелюється з попередньо проведеним малоамплітудним осциляційним зсувним дослідження і підтверджує висловлене раніше припущення, що часткова заміна кукурудзяного крохмалю тапіоковим розріджує тістову масу тим самим пом'якшуючи тісто.

Досліджуваний контрольний зразок (тісто для традиційного здобного печива) має схожу поведінку до низькобілкового печива. Це пояснюється великою кількістю жиру в рецептурі. Взаємодія жирової фази і клейковини здобного печива добре описані в літературі, що пояснює отримані результати.

Жир є важливим інгредієнтом у здобному печиві і найбільшим компонентом після борошна. Основними функціями жирів у цій системі випічки є надання хрусткості, насиченості та ніжності, а також покращення смаку та приємних відчуттів у роті [76]. У низькобілковому печиві жир також знаходиться на другому за масою місці, після крохмалю. Жир оточує білки та крохмальні гранули, обмежуючи утворення мережі клейковини [49]. Оскільки в низькобілкових системах вміст білка мінімальний, то жири що входять до рецептурного складу оточують лише крохмальні зерна. Отримане тісто має пластичні властивості, що є бажаним у виробництві печива. Науковці також вивчали в'язко-пружні властивості тіста для печива, в якому 100% жиру було замінено водною емульсією ефіру соняшникової олії з целюлозою [97]. Як і інші автори, вони виявили наявність більш рідкої структури, з нижчими значеннями модуля пружності та модуля втрати в тісті

з емульсією целюлози порівняно з контрольним тістом. Таким чином ми можемо припустити, що у разі часткової заміни вершкового масла рослинною олією в розроблених низькобілкових виробах вироби матимуть більш рідку структуру і володітимуть нижчими модулями текучості і втрат.

Науковці у своїй роботі використали модель Бургера, щоб успішно охарактеризувати поведінку здобного тіста під час випробування на повзучість та оцінити вплив заміни борошна на резисцентний крохмаль. Випробування на повзучість і відновлення показали підвищення еластичності, стійкості до розтікання і зниження деформативності при додаванні резисцентного крохмалю, що було пов'язано зі зменшенням розтікання печива під час випікання [52]. Таким чином при використанні резисцентного крохмалю у технології низькобілкових виробів буде підвижуватись еластичність і міцність тіста. В іншій роботі [79] використовували коливальні випробування та випробування на відновлення повзучості для вивчення лінійних в'язкопружних властивостей тіста, виготовленого з борошна восьми різних сортів. Вони не виявили відмінностей у відсотках відновлення при порівнянні бісквітного тіста з різних сортів, хоча максимальна деформація і відновлення сильно залежали від сорту. Науковці оцінили вплив додавання метабісульфіту натрію та комерційної протеази. Вони спостерігали збільшення розтяжності тіста та зменшення еластичності. Скорочення та розтікання печива здебільшого корелювали з відсотком відновлення тіста та вмістом білка і клейковини [79]. Це дослідження корелюється з отриманими результатами, оскільки за рахунок розкладання білків тіста під дією протеази тісто мало схожі реологічні властивості до досліджених низькобілкових тістових мас.

За даними отриманими під час дослідження деформації повзучості та відновлення низькобілкових тістових мас було розраховано коефіцієнт відновлення зворотної деформації та піддатливість системи (табл. 4.2.3).

**Таблиця 4.3.2 – Коефіцієнти відновлення зворотної деформації та піддатливість низькобілкових тістових мас.**

|                       | Величина<br>максимальної<br>деформації,<br>% | Величина<br>зворотної<br>деформації,% | Коефіцієнт<br>відношення<br>зворотної<br>деформації<br>до загальної | Піддатливість<br>системи, Па <sup>-1</sup> |
|-----------------------|--|---------------------------------------|---|--|
| Рецептура 2.3         | 0.20133                                      | 0.07753                               | 0.385089157   | 0.004027                                   |
| Рецептура 3.2         | 0.60767                                      | 0.31933                               | 0.525499037   | 0.012153                                   |
| Рецептура 2.1         | 0.4375                                       | 0.2185                                | 0.499428571   | 0.00875                                    |
| Контрольний<br>зразок | 0.734  | 0.3595                                | 0.489782016   | 0.01468                                    |

Таким чином ми бачимо, що наявність в рецептурі мальтодекстрину збільшує величину зворотної деформації з 0,07753% до 0,2185% та відповідно коефіцієнт відновлення. Тапіоковий крохмаль також збільшує величину зворотної деформації з 0,2185% до 0,31933% та відповідно коефіцієнт відновлення. Отже наявність в рецептурах низькобілкового тіста мальтодекстрину та тапіокового крохмалю підвищує пружність тіста.

#### **Висновки до розділу 4**

1. Криві в'язкості всіх низькобілкових емульсій мають поведінку зсувного потоншення, що характерна псевдопластичним рідинам. Емульсія, до складу якої входить камедь ксантану має найвищу в'язкість, а заміна частини вершкового масла на кукурудзяну олію призводить до зменшення в'язкості емульсії. Емульсії з більшою в'язкістю потребують більш потужного обладнання для приготування і перекачування емульсії.

2. Бульбашки диспергованої фази емульсії для печива Новинка, Жовтеньке і Капітошка не однорідні за розміром і досягають 160 мікрон, тому під час приготування емульсії доцільно збільшити швидкість збивання емульсій щоб розбити відносно великі бульбашки на дрібніші і таким чином досягти більш гомогенної емульсії.

3. Модулі в'язкості (втрат) низькобілкового тіста нижчі за модулі в'язкості (втрат) традиційного здобного тіста. У всіх досліджених зразках модулі пружності вищі за модулі втрат і криві не перетинаються, що свідчить про відсутність текучості матеріалу. Завдяки цьому можна зробити висновок що розроблені низькобілкові вироби доречно формувати методом виїмним методом.

4. Значення комплексної в'язкості розроблених низькобілкових виробів знаходиться в одному діапазоні з комплексною в'язкістю тіста для традиційного здобного печива, що підтверджує можливість виробництва низькобілкового печива на існуючому обладнанні.

5. За альвеографічними дослідженнями визначено, що низькобілкове тісто не має еластичності. Додавання до рецептурного складу низькобілкового печива тапіокового крохмалю збільшує індекс розтяжності тісто майже вдвічі. Таким чином наявність в рецептурному складі тапіокового крохмалю полегшить процес формування тіста, утворюючи рівномірний пласт тіста без тріщин.

6. Досліджені зразки низькобілкового тіста, як і тісто для здобного печива, володіють вираженими пластичними властивостями, що переважають над еластичними. Зразки тіста деформуються при прикладанні сили і не підлягають повному відновленню. Коефіцієнти відновлення зворотної деформації для низькобілкового тіста та тіста для традиційного здобного печива знаходяться в одному діапазоні, і складають 0,385 ... 0,525 для низькобілкового тіста, і 0,490 для тіста для традиційного здобного печива.

7. Наявність в рецептурах низькобілкового тіста мальтодекстрину та тапіокового крохмалю підвищує пружність тіста: коефіцієнт відновлення зворотної деформації зростає з 0,385 до 0,499 при додаванні мальтодекстрину, та до 0,525 при додаванні тапіокового крохмалю і мальтодекстрину.

8. Тісто для розробленого низькобілкового печива має схожі реологічні властивості до тіста для традиційного здобного печива, що підтверджує можливість виробництва низькобілкового печива на існуючих лініях для виробництва здобного печива.

## **РОЗДІЛ 5 – УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕРМООБРОБЛЕННЯ НИЗЬКОБІЛКОВОГО ПЕЧИВА**

### **5.1 Оптимізація параметрів термооброблення низькобілкового печива та зміна розмірів тістових заготовок під час термооброблення за оптимальних параметрів**

Борошняні кондитерські вироби по ходу технологічного процесу підлягають термічному обробленню, внаслідок чого тістові заготовки набувають нових якостей і перетворюються в готовий продукт. Під час термооброблення відбувається формування органолептичних, структурних показників виробів. БКВ підлягають різним видам термооброблення: випікання (бісквіти, кекси, пряники), сушіння (вафельні листи, безе), випіканню-сушінню (цукрове, зтяжне, здобне печиво).

Комбінований процес випікання-сушіння характеризується трьома періодами. В перший період починається прогрів тістової заготовки, цей період триває ~ 1,5 хв. В другий, найбільш довгий період термооброблення, значно прогріваються центральні шари і починаються витрати тепла на ендотермічні процеси. В третій період випаровування досягає центральних шарів і вологовіддача відбувається зі зниженою швидкістю, волога мігрує з центральних шарів до поверхневих [138].

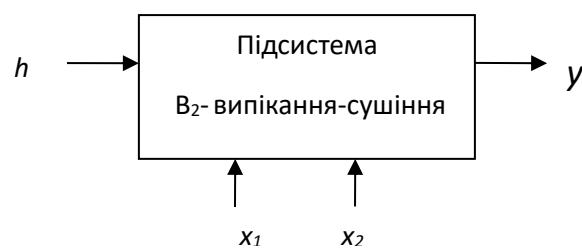
Потрібно зазначити, що на перебіг цих процесів мають вплив умови термооброблення та рецептурний склад печива. В той же час введення нових рецептурних компонентів, вилучення певних рецептурних компонентів та ін. може потребувати зміну параметрів (умов) термооброблення печива.

Під час випікання-сушіння традиційних виробів здобного печива, серед іншого, відбувається процеси пов'язані зі зміною структури білків, крохмалю борошна. В низькобілковому печиві не застосовується білкова сировина, пшеничне борошно, якщо і застосовується, то в дуже обмеженій кількості (рецептури наведено в розділі 3). З метою покращення

структурних властивостей застосовано камідь ксантану, мальтодекстин, різні співвідношення кукурудзяного і тапіокового крохмалів. Таким чином рецептурний склад суттєво відрізняється від традиційних найменувань печива, що може значно вплинути на перебіг процесу термооброблення.

Головна мета цього технологічного етапу є термооброблення (випікання-сушіння) тістової заготовки низькобілкового печива за найбільш короткий час та за раціональної температури пекарної камери, надання виробам високих якісних показників.

З точки зору системного підходу термооброблення є головною підсистемою позначеною літерою «В<sub>2</sub>» (рис. 5.1.1)



**Рис. 5.1.1 – Параметрична схема підсистеми В<sub>2</sub>**

На параметричній схемі наведено наступні позначення  $h$  – якість відформованих тістових заготовок Це некеровані фактор в даній підсистемі. Він є вихідним з підсистеми формування тістових заготовок;  $x_1, x_2$  – керовані фактори,  $x_1$  – температура середовища пекарної камери, °C;  $x_2$  – тривалість процесу термооброблення, (хв). Саме цими параметрами можна було керувати у разі проведення досліджень в лабораторних умовах;  $y$  – вихідні параметри оптимізації. по

Ми вважаємо що доцільно за параметр оптимізації обрати органолептичні показники.

За фактори керування та варіювання, як в параметричній моделі, було взято температуру пекарної камери та тривалість процесу. Матрицю експерименту наведено в таблиці 1.

**Таблиця 5.1.1 – Матриця двохфакторного експерименту**

| № досліджу | Рівні факторів |                |   |                        | Параметр оптимізації |
|------------|----------------|----------------|---|------------------------|----------------------|
|            | X <sub>1</sub> | X <sub>2</sub> | X <sub>1</sub> , t <sub>вип.</sub> , °C | X <sub>2</sub> , τ, хв | Бали                 |
| 1          | -              | -              | 200                                     | 10                     | 3,0                  |
| 2          | -              | +              | 200                                     | 13                     | 3,75                 |
| 3          | +              | -              | 220                                     | 10                     | 4,5                  |
| 4          | +              | +              | 220                                     | 13                     | 4,0                  |

Рівняння регресії:  $Y = 3,75 + 0,5 X_1 + 0 X_2 - 0,25 X_1 X_2$

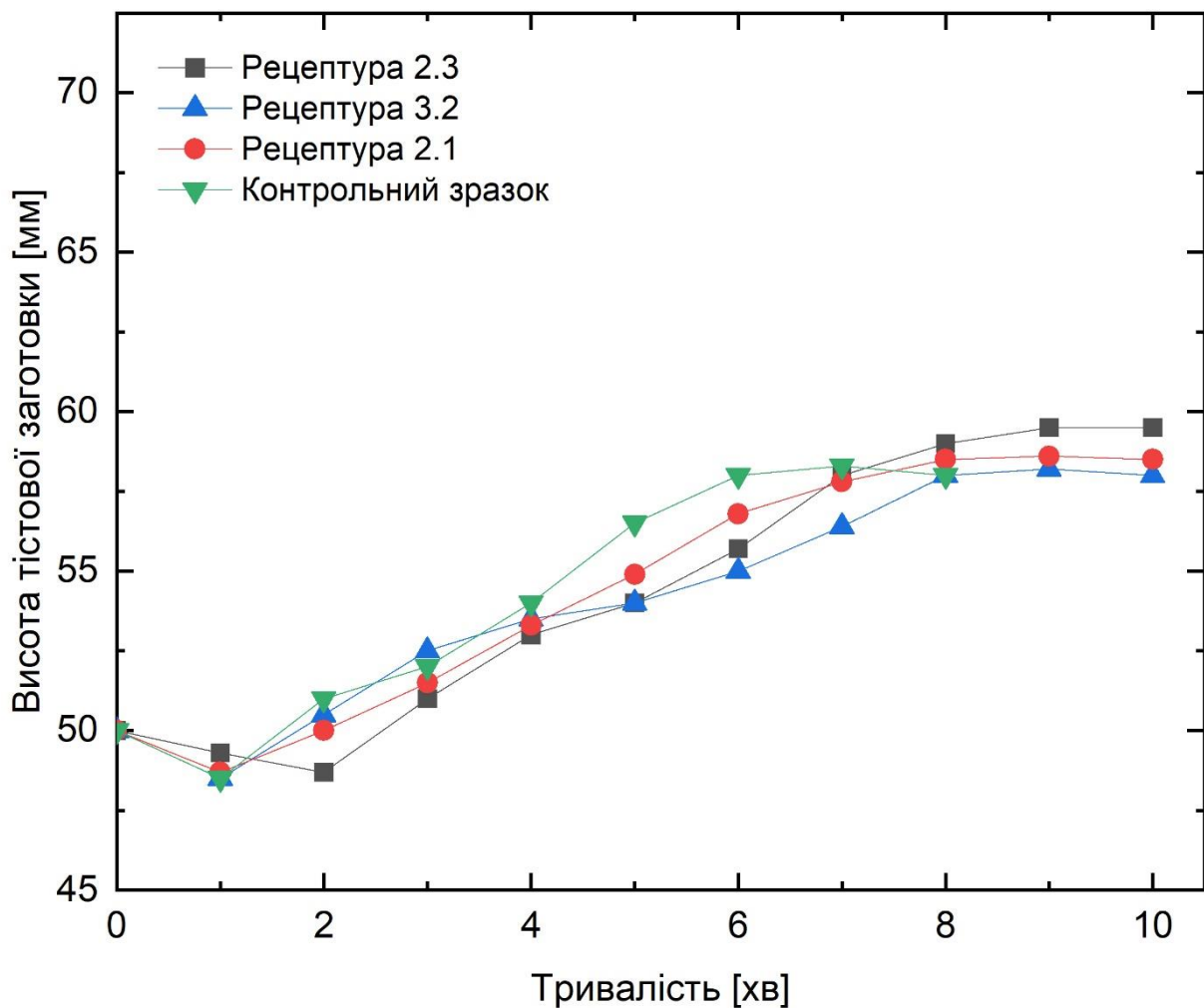
За проведеним експериментом встановлено, що термооброблення низькобілкового печива потребує більше часу. Таким чином встановили оптимальні параметри термооброблення: температура випікання-сушіння – 220 °C, та тривалість випікання – 10 хвилин. За таких умов термооброблення печиво мало найкращу якість. В усіх зразках відмічено рівномірну пористість, приємний колір скоринки, гладку поверхню.

За встановлених оптимальних параметрів термооброблення визначили зміну висоти тістової заготовки під час випікання-сушіння. Радикальна зміна рецептурного складу в печиві може призвести до збільшення його висоти та діаметра після теплової обробки порівняно з традиційним печивом [14].

Розширення тіста (збільшення геометричних розмірів) спричинене дією розпушувачів та зміною хімічного стану компонентів рецептури. В результаті такого збільшення розмірів формувалася структура виробу, зокрема: пористість, рихлість, яка значною мірою визначає сенсорне сприйняття продукту. Крім того, збільшення діаметра тістової заготовки під час випікання та сушіння печива має переважно технологічні аспекти. Тістові заготовки для печива формуються на підлозі пекарної камери на певній відстані одна від одної [20]. Під час теплової обробки тістові

заготовки збільшуються в діаметрі та зближуються одна з одною [132]. Якщо не врахувати це збільшення при формуванні тістових заготовок, тістові заготовки можуть торкатися одна одної і злипатися наприкінці термообробки. Це є технологічним дефектом, і така продукція не може бути реалізована, що призводить до втрати прибутку компанії. Тому виникла потреба визначити збільшення геометричних розмірів низькобілкових бісквітних тістових заготовок під час випікання та сушіння [131].

Зміну висоти тістових заготовок під час теплової обробки при 220°C протягом 10 хв (рис. 5.1.2).



**Рис. 5.1.2 – Зміна висоти тістових заготовок під час термічної обробки при 220°C**

В перший період спостерігається зниження висоти тістової заготовки. Це пояснюється плавленням жирової складової [138]. Для низькобілкового

печива характерне більше зменшення висоти тістової заготовки та збільшення діаметру. Другий період – період росту тістової заготовки. Це найдовший період – до 70% загальної тривалості термооброблення. Для заготовок з низькобілкового тіста спостерігається дещо менше збільшення висоти. Ймовірно, це може бути пов'язано з відсутністю в рецептурі достатньої кількості білка що вноситься в традиційні вироби з яйцепродуктами, відсутністю клейковинних білків борошна які в традиційних виробках сприяють формуванню структури. Разом з тим, наявність в рецептурах низькобілкових виробів камеді ксантану і мальтодекстрину надає можливість сформувати необхідну структуру виробів.

В третій період термооброблення традиційного і низькобілкового печива відмічається постійна висота тістової заготовки. Тривалість цього періоду в усіх досліджуваних зразках 20-23% від загальної тривалості термооброблення. В останній четвертий період спостерігається деяке зменшення висоти тістової заготовки. При цьому, зменшення висоти тістової заготовки низькобілкового печива менше, ніж у традиційного печива. Ймовірно це пов'язано з фактичною відсутністю білкових речовин в досліджуваних зразках.

## **5.2 Термічний аналіз низькобілкових тістових мас**

Основними компонентами, на які впливає термічна обробка, є вуглеводи, білки, жири та вода. Ці температурні зміни спричиняють зміни фізичних (плавлення, кристалізація, випаровування, агрегація та гелеутворення) та хімічних властивостей (гідроліз, окислення та відновлення) харчових матеріалів, які впливають на властивості кінцевого продукту, такі як смак, колір, зовнішній вигляд, текстура та стабільність. Термічний аналіз (ТА) добре зарекомендував себе як інструмент для застосування в харчовій промисловості, оскільки він дозволяє вивчати фізичні та хімічні зміни, пов'язані зі зміною температури, які відбуваються

під час виробництва харчових продуктів. Таким чином, краще розуміння цих процесів дозволяє як контролювати, так і оптимізувати умови технологічного процесу, а отже, покращувати якість [47]. Не зважаючи на широку поширеність термічного аналізу, низькобілкові тістові маси не були досліджені.

Міжнародна конфедерація термічного аналізу і калориметрії визначила ТА як "вивчення взаємозв'язку між властивостями зразка і його температурою при контрольованому нагріванні або охолодженні". ТА охоплює набір методів, які дозволяють вимірювати фізичні або хімічні властивості речовин або продуктів їхньої реакції як при контрольованому нагріванні, так і при охолодженні. Це є важливим, для розуміння процесів які проходять і тістовій заготовці під час термічного оброблення [47].

Дослідження поведінки сировини та продуктів під час нагрівання мають велику цінність для харчової промисловості. Дослідники ще не проводили термічний аналіз низькобілкових напівфабрикатів та тістових мас, тому нами було виконано найпоширеніші термічні аналізи, що використовуються у наукових і промислових лабораторіях харчових промисловості: термоаналітичний аналіз, диференціальний термічний аналіз, та диференційна сканувальна калориметрія.

Термогравіметричний і диференціальний термічний аналізи були виконані за допомогою дериватографа (графіки в додатку).

### **5.2.1 Термогравіметричний аналіз низькобілкових тістових мас**

Спостерігаючи за даними кривої ТГ, можна визначити температуру, при якій відбувається початок зміни маси низькобілкового напівфабрикату, а також кінцеву температуру.

Перша похідна ТГ, відома як ТГА, використовується для допомоги в цій ідентифікації. Це математичний параметр, а не термоаналітичний метод, який отримують за першою похідною зміни маси з часом ( $dm/dt$ ) відповідно до температури або часу. Крива ТГА дозволяє підвищити точність

вимірювань, визначаючи початок і кінець термічних процесів, а також полегшує диференціацію подій, що накладаються [69].

Коли зразок стабільний, або з незначними змінами маси, крива ТГ розглядається як константа, і тому похідна дорівнює нулю (крива ДТГ залишається прямою лінією). Плато може вказувати на термічну стабільність матеріалу в даному температурному діапазоні. Всі досліджені зразки після досягання температури 40°C знаходяться в термічній нестабільності під час всього дослідження, оскільки постійно відбувається процес видалення вологи.

Щоразу, коли зразок змінює масу, на кривій ТГ утворюється перегин, від якого обчислюється перша похідна і утворюються піки, які обмежують ділянки, пропорційні змінам маси, яких зазнав зразок. Таким чином, отримують криву ДТГ, на якій можна визначити початкову, пікову та кінцеву температуру процесу. Пікова температура відповідає температурі, при якій швидкість реакції максимальна. Крім того, коли відбуваються послідовні реакції, крива ТГ не є достатньою для інтерпретації процесу, тому вона підтримується кривою ДТГ [47].

Аналізуючи результати досліджень бачимо, що під час прогріву тістового зразку спостерігається зменшення маси (табл. 5.2.3).

**Таблиця 5.2.3 – Зменшення маси під час прогріву тістового зразку на дериватографі**

| Температура,<br>°C | Маса тістового зразку                 |       |                                       |       |          |       |
|--------------------|---------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|----------|-------|
|                    | Зразок виготовлений за рецептурою 2.1 |       | Зразок виготовлений за рецептурою 2.3 |       | Контроль |       |
|                    | Мг                                    | %     | Мг                                    | %     | мг       | %     |
| 20                 | 62,10                                 | 100,0 | 66,7                                  | 100,0 | 75,40    | 100,0 |

|     |       |      |       |       |       |      |
|-----|-------|------|-------|-------|-------|------|
| 40  | 61,30 | 98,7 | 64,28 | 96,4  | 72,64 | 96,3 |
| 60  | 58,11 | 93,6 | 61,86 | 92,74 | 70,34 | 93,3 |
| 80  | 55,73 | 89,7 | 57,02 | 85,5  | 65,28 | 86,6 |
| 100 | 50,74 | 81,7 | 47,35 | 71,0  | 55,85 | 74,1 |
| 120 | 47,76 | 76,9 | 42,99 | 64,5  | 51,48 | 68,5 |
| 160 | 45,77 | 73,7 | 39,6  | 59,4  | 44,58 | 59,1 |
| 175 | 45,37 | 73,1 | 39,1  | 58,6  | 44,12 | 58,5 |
| 200 | 44,97 | 72,4 | 37,67 | 56,5  | 42,28 | 56,1 |
| 240 | 37,60 | 60,5 | 24,60 | 36,9  | 29,40 | 39,0 |

Аналізуючи результати досліджень можна зробити висновок, що мінімальне зменшення маси притаманно зразку виготовленому за рецептурою 2.3. В рецептурному складі цього зразку в якості структуроутворювача застосовано камідь ксантану. В зразку 2.1 як структуроутворювачі використано камідь ксантану та мальтодекстрин. Зменшення маси цього зразку наближається до зменшення маси контрольного зразку. В даному діапазоні температур зменшення маси тістових зразків переважно пов'язано з виділенням води. Тобто можна говорити про те, що виділення води на початку прогріву в усіх зразках відбувається фактично однаково. Під час подальшого прогріву виділення води в зразку 2.1 відрізняється від зразків 2.3 та контролю. За температури 80<sup>0</sup>С в зразку 2.1 зменшення маси відбувається на 10,3%, в зразку 2.3 на 14,5%, в контрольному зразку на 13.4%. За температури 120<sup>0</sup>С різниця між видаленням води збільшується : зразок 2.1 – 23,1%, зразок 2.3 – 35,5%, контрольний зразок –31,5%. Дослідження проводили до температури 240<sup>0</sup>С.

За цієї температури зменшення маси в зразку 2.1 дорівнює 39,5%. в зразку 2.3 – 63,1%, в контрольному зразку 61,0%.

В контрольному та дослідних зразках при досягненні температури 60<sup>0</sup>С спостерігається збільшення втрати маси. Досить стрімка втрата маси спостерігається за температури 150-155<sup>0</sup>С (зразок 2.1), 153-155<sup>0</sup>С ( зразок 2.3), 158-160<sup>0</sup>С (контроль). При досягненні цих температур на кривій зменшення маси спостерігається сповільнення спаду, тобто втрата маси призупиняється. Таке сповільнення спаду виглядає на графіку як пряма лінія, майже паралельна до осі ординат, і більше візуалізується у зразків 2.1 та 2.3. В подальшому при досягнення температури 200<sup>0</sup>С в дослідних та контрольному зразку відмічено другий етап зменшення маси.

Другий етап зменшення маси може бути пов'язаний з тим, що полімери, які піддаються термічній обробці, можуть демонструвати структурні зміни, такі як розрив хімічних зв'язків як в основному, так і в бічних ланцюгах, що призводить до зменшення молярної маси. Термічний розпад матеріалу буде залежати від хімічних факторів, таких як міцність первинних, вторинних або ван-дер-ваальсових зв'язків або водневих зв'язків, симетрія і жорсткість внутрішньомолекулярної структури, ступінь зшивання і розгалуження. Фізичні фактори включають чистоту, молярну масу і молекулярні взаємодії [57]. основний процес який спостерігається у низькобілкових системах при ТГА є видалення вільної і зв'язаної води. Як вже було зазначено рецептурний склад низькобілкового печива суттєво відрізняється від складу традиційних виробів, що може впливати на кількість вільної та зв'язаної води.

Потрібно зазначити, що такі температури не характерні для прогріву тістових заготовок під час випікання-сушіння печива. Наприкінці випікання-сушіння температура поверхневих шарів печива досягає 160-165<sup>0</sup>С, центральних – 106-108<sup>0</sup>С.

За результатами термогравіметричних досліджень визначено зменшення маси. В межах діапазону температур досліджень зменшення маси переважно пов'язано з виділенням вологи (табл. 5.2.3).

Низькобілковий зразок 2.3 та контрольний зразок мають схожу загальну втрату маси (61,0 та 63,1% відповідно). В той же час, зразок 2.1 втрачає найменшу кількість маси (39,5). Масова частка вологи всіх досліджених тістових мас складала 23,9 %, таким чином ми бачимо, що крім виділення вільної і зв'язаної вологи відбувались і інші процеси у полімерах, що супроводжувались зменшенням маси зразків.

Необхідно зазначити, що термічна обробка, якій піддаються досліджувані зразки під час досліджень на дериватографі, відрізняються від термічної обробки в пекарній камери. В першу чергу це пояснюється розміром тістової заготовки. Для дериватографічного дослідження маса тіста складала від 62.1 до 75.4 мг (від 0,0621 до 0,0754 г), в той час як маса тістової заготовки печива зазвичай починається від кількох грамів. Таким чином, досліджувані зразки швидше досягають високої температури у внутрішніх шарах тістової заготовки. Тривалість термічної обробки також відрізняється. Під час дериватографічних досліджень тривалість термічної обробки складала 35 хвилин, в той час як термічна обробка низькобілкової тістової маси у ході технологічного процесу складає не більше 10 хвилин.

Знаючи вологість напівфабрикатів ми можемо визначити температуру, при якій закінчується видалення вологи з досліджуваних зразків, та починається їх термічне розкладання. Зразок 2.1 втрачає всю розрахункову вологу при температурі 129°C, зразок 2.3 втрачає всю розрахункову вологу при температурі 95,4°C, а контрольний зразок при температурі 98,7°C.

### **5.2.2 Диференціальний термічний аналіз низькобілкових тістових мас**

Термогравіметричний аналіз надає інформацію, пов'язану з варіаціями маси аналізованого продукту. Щоб отримати більше інформації про

термічну характеристику та процеси, що відбуваються в тістовій заготовці після видалення всієї вологи, було проведено ДТА. У цьому аналізі можна оцінити, чи є реакції, що відбуваються під час термічної обробки, ендотермічними (з поглинанням енергії) або екзотермічними (з виділенням енергії), на основі піків, що утворюються. Для отримання цієї інформації необхідно порівняти різницю температур між зразком та інертним матеріалом, також відомим як еталон. Таким чином, обидва нагріваються лінійно, і різниця температур ( $T = T_{\text{reference}} - T_{\text{sample}}$ ) буде записана як функція температури печі або часу [124].

Графіки, отримані в результаті ДТА-аналізу, показують на осі ординат зміну температури, а на осі абсцис - час або температуру.

При нагріванні зразка, якщо не відбуваються фізичні або хімічні явища, реєструється паралельна лінія зміни температури по відношенню до осі часу. Однак при виділенні тепла в екзотермічних процесах реєструється підвищення температури, що відображається перегином на температурно-часовому профілі. Це справедливо і для ендотермічних процесів, в яких тепло поглинається зразком і реєструється зниження температури, також представлене точкою перегину, тобто буде спостерігатися зсув від базової лінії. Таким чином, в ДТА відстежується зміна фізичної властивості (температури) зразка, порівнюючи його з термічно інертним матеріалом (не поглинає і не виділяє тепло), який називається еталоном [37]. Однак цей метод відрізняється від ДСК тим, що вимірювання проводяться на основі зміни температури зразка відносно інертного еталонного матеріалу, тоді як в ДСК, калориметричному методі, можна оцінити зміну енергії між зразком і еталоном, що навіть може бути використано як кількісний аналіз, на відміну від ДТА .

Різниця температур, виміряна в ДТА, є функцією теплопровідності і щільності зразка, тому цей аналіз є не кількісним (з точки зору кількості тепла, що бере участь у зміні температури), а якісним. Тому в записі

вказуються лише значення температури, на яку змінився зразок, а також інформація про те, чи була ця подія ендотермічною або екзотермічною. Величина цієї різниці температур за певний час пропорційна зміні ентальпії, теплоємності та загального термічного опору тепловому потоку.

За дериватограмами (додаток) ми бачимо, що до температури 80°C крива ДТА має лінійний характер, коли зразки досягають 80°C і продовжує рости спостерігається чітко виражений ендотермічний пік, що досягає свого максимуму при температурі 120°C. За температури 150-160°C спостерігається екзотермічний пік, що співпадає з пиршвидшенням втрати маси на шкалі ТГ.

Серед ендотермічних процесів, які можна виміряти за допомогою цього методу, є кристалічний перехід, плавлення, випаровування, сублімація, десорбція, перехід точки Кюрі, дегідратація і розкладання. Екзотермічні події - це окислювальна деградація, розкладання, окислення в газовій атмосфері, горіння і полімеризація [70]. На аналіз можуть впливати швидкість нагрівання печі, характер тигля, розташування, природа і розміри диференціальних термопар, природа інертної речовини, що використовується як еталон, ущільнення зразка, наявність або відсутність кришки і атмосфера в печі [68].

Таким чином ендотермічний пік за температури 80°C ми можемо пояснити інтенсифікацією випаровування вологи, а екзотермічний пік за температур 150-160°C термічним розкладанням досліджуваних зразків [44].

### **5.3.3 – Диференційна сканувальна калориметрія низькобілкових тістових мас**

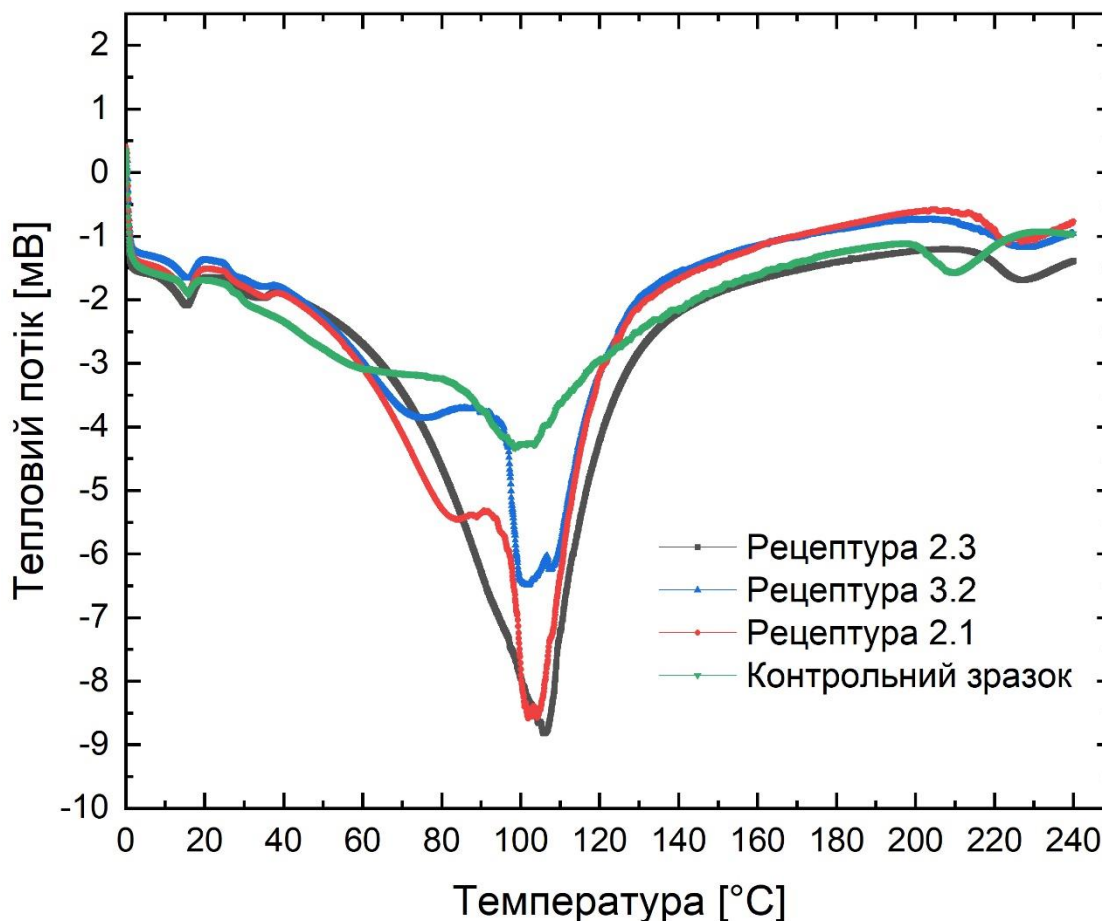
Для більш детального дослідження ендотермічних та екзотермічних процесів, що відбуваються в низькобілкових тістових масах при термообробленні було проведено ДСК.

Фізичні або хімічні зміни в речовині спричиняють зміну її ентальпії. За допомогою ДСК було визначено зміну ентальпії, яка відбувається між

низькобілковим тістом і еталоном в процесі нагрівання/охолодження. Диференціальний аналіз отримав свою назву саме тому, що зразок порівнюється з термічно інертним матеріалом, який називається еталоном [68]. Цей аналіз вважається кількісним (ентальпія відома за площею піків, які реєструються під час аналізу) і якісним (завдяки такій інформації, як форма, положення і кількість піків [93]. Площі під піками пропорційні змінам ентальпії, що відбуваються в кожному перетворенні, якого зазнає зразок під час контрольованої програми нагрівання/охолодження [65].

За допомогою ДСК оцінено фізичні та хімічні зміни зміни в зразку під впливом змін температури. Загалом, фазові переходи, дегідратація, відновлення і деякі реакції розкладання спричиняють ендотермічні ефекти, тоді як кристалізація, окислення і деякі реакції розкладання пов'язані з екзотермічними ефектами [47].

Зазвичай графік ДСК подається без маси зразка. Однак, для того, щоб отримати зміну ентальпії будь-якого процесу, виражену, наприклад, у Дж/г або мВт, її необхідно ввести в програмне забезпечення перед початком вимірювання [65]. Важливо відрізнити ендотермічні процеси від екзотермічних, головним чином через схожість кривих ДСК і ДТА.



**Рис. 5.3.1 Криві диференційної сканувальної калориметрії  
низькобілкових тістових мас.**

На графіку ДСК (рис. 5.3.1) чітко видно, що всі досліджені зразки поглинають різну кількість енергії під час процесу нагрівання. Криві ДСК дещо схожі на криві ДТА, проте відображають ендотермічні процеси. Всі досліджувані зразки прогрівались при температурі від 0 да 240°C. На початку кривої ми бачимо що всі зразки поведуть себе однаково і активно поглинають тепло.

У діапазоні температур від 20 до 30°C спостерігається ендотермічний пік, пов'язаний з переходом плавлення жирової фази, що відповідає низькому та середньому плавленням [34]. Коли температура досягає 40°C, ендотермічний процес знову спостерігається у всіх зразках. Це пов'язано зі зміною агрегатного стану жирової фази: переходом вершкового масла з твердого стану в рідкий, що асоціюється з високим плавленням [34]. При

подальшому підвищенні температури поведінка кривих всіх досліджуваних зразків дещо відрізняється.

На відміну від низькобілкових тістових мас, у контрольному зразку ендотермічний процес зміни агрегатного стану вершкового масла одразу супроводжується початком денатурації білків пшеничного борошна, а потім супроводжується клейстеризацією крохмалю. Таким чином ці послідовні ендотермічні процеси дещо накладаються один на одного, за рахунок чого на графіку відсутні чіткі піки для кожного процесів. При температурі 90°C починається інтенсифікація видалення вологи з досліджуваного зразка. Пік ендотермічного процесу припадає на температуру 102°C. Криві ДТГ для рецептур 3.2 та 2.1 мають схожий характер. За температури 55°C починається ендотермічний процес клейстеризації крохмалів що входять до складу зразків. Порівняно зі зразком, виготовленим за рецептурою 2.3 ендотермічний пік починається за нижчої температури. При температурі 78°C знижується поглинання енергії зразком виготовленим за рецептурою 3.2, що пояснюється частковою заміною в цій рецептурі кукурудзяного крохмалю тапіоковим. За температури 100°C починається ще один стрімкий ендотермічний пік пов'язаний з видаленням вологи. У зразку 2.1 інтенсифікація процесу видалення вологи починається на 2°C раніше порівняно зі зразком виготовленим за рецептурою 3.2.

Крива ДСК зразка виготовленого за рецептурою 2.3 має інший вигляд порівняно зі зразками, що містять у своєму складі мальтодекстрин (виготовлені за рецептурами 2.1 та 3.2). Найбільший ендотермічний пік починається при температурі 60°C і досягає свого максимуму при температурі 108°C. У цьому ендотермічному піку наклались два основних ендотермічних процеси: клейстеризація крохмалю та інтенсивне видалення вологи з тістової заготовки.

При підвищенні температури спостерігаються екзотермічні процеси, що може означати термічне розкладання всіх досліджуваних зразків.

З кривих ДСК можна розразувати кількість енергії, необхідної для теплової обробки низькобілкового тіста та контрольного зразка (Додаток Б). Найменша кількість енергії необхідна для теплової обробки тіста для традиційного здобного печива,  $\Delta H=124,05$  Дж/г. Теплова обробка низькобілкового тіста потребує більше енергії. Це пов'язано з наявністю в рецептурі ксантанової камеді та крохмалю. Найбільша кількість енергії необхідна для теплової обробки зразка тіста з кукурудзяним крохмалем та ксантановою камедью -  $268,33$  Дж/г. Зразок тіста з кукурудзяним крохмалем, мальтодекстрином та ксантановою камедью потребує менше енергії, оскільки загальна площа ендотермічного піку менша -  $262,01$  Дж/г. Це може бути пов'язано з тим, що мальтодекстрин у рецептурі цього зразка поглинає деяку кількість води, і ця вода легше виділяється під час термообробки порівняно з водою, поглиненою крохмалем і ксантановою камедью. Це може відбуватися через конкуренцію за воду між мальтодекстрином і крохмалем у рецептурі тіста з низьким вмістом білка [134, 124]. Теплова обробка зразка тіста, виготовленого з кукурудзяного та тапіокового крохмалів, мальтодекстрину та ксантанової камеді, потребує найменшої кількості енергії -  $199,46$  Дж/г - серед усіх досліджуваних низькобілкових тістових виробів. Це пов'язано з властивостями крохмалю тапіоки, що входить до рецептури, оскільки для клейстеризації крохмалю тапіоки потрібно менше енергії.

### **Висновки до розділу 5**

1. Оптимальні параметри термооброблення низькобілкового печива становлять 10 хвилин при температурі  $220^{\circ}\text{C}$ , що на 4 хвилини довше порівняно з тепловою обробкою традиційного здобного печива.

2. Наявність мальтодекстрину в рецептурі низькобілкового тіста для здобного печива збільшує видалення вологи під час теплової обробки. Низькобілковий зразок, виготовлений з кукурудзяного крохмалю та

ксантанової камеді, втрачає всю вологу при 129°C, низькобілковий зразок, виготовлений з кукурудзяного крохмалю, мальтодекстрину та ксантанової камеді, втрачає всю розрахункову вологу при 95,4°C, а контрольний зразок - при 98,7°C під час вимірювання ТГА.

3. При проведенні термогравіметричного аналізу спостерігалась втрата маси після видалення всієї вологи з досліджуваних зразків, що свідчить про термічне розкладання тіста.

4. Під час термічного аналізу спостерігались ендотермічні (з поглинанням енергії) та екзотермічні (з виділенням енергії) процеси, зокрема плавлення жирової фази, клейстеризація крохмалю, денатурація білків, видалення вологи та хімічне розкладання білків.

5. Наявність мальтодекстрину в рецептурі низькобілкового печива призводить до незначного зниження енергії, необхідної для випікання: 268,33 Дж/г без мальтодекстрину та 262,01 Дж/г з мальтодекстрином.

6. Заміна 20% кукурудзяного крохмалю на крохмаль тапіоки у рецептурі призводить до значного зниження енергії, необхідної для випікання: зразок зі 100% кукурудзяного крохмалю має  $\Delta H=262,01$  Дж/г, зразок з кукурудзяним і тапіоковим крохмалем має  $\Delta H=199,46$  Дж/г.

7. Найменша кількість енергії необхідна для теплової обробки тіста для традиційного здобного печива:  $\Delta H=124,05$  Дж/г. Теплова обробка низькобілкового тіста потребує більше енергії:  $\Delta H=199,46 - 268,33$  Дж/г.

## **РОЗДІЛ 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ РОЗРОБЛЕНОГО НИЗЬКОБІЛКОВОГО ПЕЧИВА**

### **6.1 Органолептичні, фізико-хімічні, структурні показники розробленого низькобілкового печива**

Всі показники якості печива, що направляється в торгівельну мережу мають відповідати вимогам ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови». Органолептичні показники мають ключове значення для споживача. Якщо споживачу не подобаються смак, запах та інші показники будь-яких виробів, що сприймаються органами чуття, такі вироби не будуть користуватись попитом.

Під час розробки рецептури низькобілкових виробів дослідження відбувались у 4 етапи, Було оцінено органолептичні показники всіх розроблених рецептур та зазначено їх відповідність вимогам ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови».

Детальний опис органолептичних показників виробів розроблених на всіх етапів досліджень знаходиться у додатках (Додаток В).

З виробів розроблених на першому етапі досліджень лише печиво виготовлене за рецептурою 1.3 відповідає вимогам ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови». Всім виробам притаманний блідий колір, оскільки за рахунок низького вмісту білків реакція меланоїдиноутворення майже не відбувається, таким чином в готових виробках майже не формуються меланоїдини, що в традиційних борошняних кондитерських виробках надають готовим виробам приємного кольору. Використання структуроутворювачів камеді гуара та карбоксиметилцелюлози у помірних кількостях здатне покращити органолептичні властивості готових виробів.

Як зазначено у розділі 3, на другому етапі досліджень ми прагнули зменшити кількість білків, тому було прийняте рішення відмовитись від використання пшеничного борошна. З таблиці органолептичних показників

(Додаток В) видно, що вироби виготовлені за рецептурами 2.1 та 2.3 мають найкращі органолептичні показники. Проте при споживанні таких виробів крохмаль відчувається у ротовій порожнині. Порівняно з виробами виготовленими у першому блоці досліджень, вироби виготовлені у другому блоці досліджень мають світліший колір. Єдиним винятком є виріб виготовлений за рецептурою 2.1, який має більше виражений жовтуватий колір порівняно з іншими зразками. Це пов'язано з наявністю мальтодекстрину, що під дією високих температур в процесі термічної обробки може вступати в реакцію карамелізації. Світлий колір виробів пов'язаний з тим, що у складі таких виробів відсутня білкова сировина. Як описано у розділі 3, для покращення якості готових виробів частину кукурудзяного крохмалю було замінено на тапіоковий у третьому блоці досліджень, що позитивно вплинуло на органолептичні властивості виробів.

Печиво «Ванільна мрія» виготовлене за рецептурою 2.1 було представлено для дегустаційної до СГДК та затверджено рецептуру та технологічні інструкції (Додатки Г і Д).

За отриманими результатами третього блоку досліджень ми бачимо, що часткова заміна кукурудзяного крохмалю на тапіоковий покращує смакові властивості виробів і текстуру. Завдяки наявності в складі тапіокового крохмалю при розжовуванні зразків не відчувався присмак кукурудзяного крохмалю. Зразок виготовлений за рецептурою 3.2 має найкращі органолептичні показники, що відповідають вимогам ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови». Проте при заміні 35% кукурудзяного крохмалю на тапіоковий тістові заготовки втрачають форму при випіканні і розтікаються.

Печиво «Ванільна фантазія» виготовлене за рецептурою 3.2 було представлено для дегустаційної до СГДК та затверджено рецептуру та технологічні інструкції (Додатки Г і Д).

Враховуючи потребу хворих на фенілкетонурию у нутрієнтах, на четвертому етапі було розроблено низку виробів з покращеним нутрієнтним складом на основі моделі ідеального продукту та описано органолептичні показники розроблених низькобілкових виробів (Додаток В).

Всі вироби розроблені у 4 блоці досліджень мають приємний смак і відповідають вимогам ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови». Печиво «Шоколадна фантазія» має приємний шоколадний смак, який досягається додаванням до рецептури какао порошку. Структура та смакові властивості печива не поступаються традиційному здобному печиву. Печиво «Шоколадна фантазія» було представлено для дегустаційної до СГДК та затверджено рецептуру та технологічні інструкції (Додатки Г і Д).

Печиво «Новинка» має більш щільну структуру порівняно з іншими зразками. Присмак крохмалю не відчувається у роті. До цього низькобілкового печива додається невелика кількість пшеничного борошна та резисцентний крохмаль, які формують необхідну структуру цих виробів.

Печиво «Жовтеньке» містить у своєму складі морквяне пюре. Саме морквяне пюре покращує харчову цінність цього виду виробів та забезпечує приємний жовтий колір за рахунок наявності каротину.

Печиво «Тік-Так» та «Топініжка» мають схожі органолептичні властивості до печива виготовленого за рецептурами 2.1 і 3.1, основною відмінністю є наявність кориці меленої, яка надає виробам приємного аромату характерного кориці.

В процесі термічної обробки тістові заготовки перетворюються з напівфабрикату у готовий продукт. В результаті змін, яким піддаються компоненти низькобілкових виробів змінюється і геометричні розміри готових виробів порівняно з тістовими заготовками. У технологічному процесі важливо знати % збільшення діаметра, для того щоб розрахувати відстань між тістовими заготовками у пекарній камері і правильно налаштувати обладнання. Якщо відстань між тістовими заготовками буде

дуже малою, тоді при збільшенні в діаметрі під час випікання тістові заготовки будуть злипатись між собою. Якщо відстань між тістовими заготовками буде більшою за необхідну, технологічний процес буде дорожчати через не раціональне використання енергоресурсів. Геометричні зміни всіх розроблених виробів наведені в таблиці 6.1.1.

**Таблиця 6.1.1 – Зміна геометричних розмірів низькобілкового печива до і після випікання.**

| Низькобілкове печиво виготовлене за рецептурою | Діаметр, см  |                 | Висота, см   |                 | Відношення висоти тістової заготовки до діаметра | % збільшення D | % збільшення H |
|--|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--|----------------|----------------|
|  | До випікання | Після випікання | До випікання | Після випікання |  |                |                |
| 1.1  | 5.000        | 7.069           | 0.500        | 0.500           | 7.073  | 41.379         | 0.000          |
| 1.2  | 5.000        | 6.667           | 0.500        | 0.563           | 8.438  | 33.333         | 12.500         |
| 1.3  | 5.000        | 6.429           | 0.500        | 0.591           | 9.192  | 28.571         | 18.182         |
| 1.4  | 5.000        | 5.968           | 0.500        | 0.611           | 10.240   | 19.355         | 22.222         |
| 1.5  | 5.000        | 6.406           | 0.500        | 0.600           | 9.366  | 28.125         | 20.000         |
| 2.1  | 5.000        | 6.150           | 0.500        | 0.595           | 9.675  | 23.000         | 19.000         |
| 2.2  | 5.000        | 5.950           | 0.500        | 0.555           | 9.328  | 19.000         | 11.000         |
| 2.3  | 5.000        | 6.000           | 0.500        | 0.580           | 9.667  | 20.000         | 16.000         |
| 2.4  | 5.000        | 5.975           | 0.500        | 0.570           | 9.540  | 19.500         | 14.000         |
| 3.1  | 5.000        | 6.219           | 0.500        | 0.590           | 9.487  | 24.380         | 18.000         |
| 3.2  | 5.000        | 6.450           | 0.500        | 0.585           | 9.070  | 29.000         | 17.000         |
| 3.3  | 5.000        | 7.350           | 0.500        | 0.500           | 6.803  | 47.000         | 0.000          |
| 4.1  | 5.000        | 6.025           | 0.500        | 0.610           | 10.124   | 20.500         | 22.000         |
| 4.2  | 5.000        | 5.925           | 0.500        | 0.595           | 10.042   | 18.500         | 19.000         |
| 4.3  | 5.000        | 6.100           | 0.500        | 0.605           | 9.918  | 22.000         | 21.000         |
| 4.4  | 5.000        | 6.490           | 0.500        | 0.590           | 9.091  | 29.800         | 18.000         |
| 4.5  | 5.000        | 6.510           | 0.500        | 0.590           | 9.063  | 30.200         | 18.000         |

Відношення висоти виробу до його діаметра має важливе значення для низькобілкових виробів. Зміна співвідношення висоти до діаметру до і після випікання печива також важливе, оскільки воно безпосередньо впливає на кінцевий результат випічки. Перш за все, за зміною цього співвідношення можна прогнозувати розтікання печива під час термічної обробки. Печиво

з більшим співвідношенням висоти до діаметру, менше розтікатиметься під час випікання, що призводить до отримання товстішого печива. І навпаки, печиво з меншим співвідношенням, як правило, розтікається більше, що призводить до отримання тоншого печива.

До термічної обробки співвідношення висоти до діаметра всіх тістових заготовок становило 10%. Для більшості низькобілкового печива це співвідношення зменшилось після термічної обробки, що означає збільшення діаметру тістових заготовок порівняно до збільшення висоти. Оскільки низькобілкові тістові заготовки мають у своєму складі обмежену кількість борошна (або взагалі його не мають), клейковинний каркас здатний утримувати форму тістової заготовки відсутній. У низькобілкових системах форма тістової заготовки забезпечується наявністю структуроутворювачів, проте при підвищенні температури пекарної камери жирова складова починає плавитись і тістова заготовка збільшується у діаметрі. За отриманими даними ми бачимо, що наявність в рецептурах структуроутворювачів камеді ксантану, гуару та карбоксиметилцелюлози здатне збільшити співвідношення висоти до діаметра. При збільшенні вмісту тапіокового крохмалю співвідношення висоти до діаметра суттєво збільшується, таким чином надмірна кількість тапіокового крохмалю призводить до розтікання тістових заготовок.

Зміна співвідношення висоти до діаметру впливає на текстуру печива. Під час випікання печиво піднімається, оскільки воно розпушується завдяки розпушувачам наявним у рецептурному складі. Це впливає на кінцеву текстуру печива - печиво, яке більше розтікається, як правило, тонше і хрусткіше, тоді як печиво, яке менше розтікається, товстіше і часто більш жувальне. Досягнення бажаної текстури має вирішальне значення для загальної якості печива.

Всі зразки досліджуваного печива мають рівномірну висоту, що позитивно впливає на якість готових виробів. Випікання печива з постійним

співвідношенням висоти до діаметру гарантує, що воно пропікається рівномірно. Коли печиво рівномірно розподіляється, воно випікається з однаковою швидкістю, запобігаючи таким проблемам, як нерівномірне випікання або недопікання одних частин печива, а інших - перепікання.

Вміст вологи в печиві є фундаментальним параметром, який суттєво впливає на його структурні та органолептичні властивості. Вміст вологи впливає на кристалізацію цукрів у печиві. За наявності достатньої кількості вологи цукор розчиняється і перекристалізовується під час охолодження, сприяючи формуванню бажаної текстури. Контроль вологості є життєво важливим для запобігання надмірній кристалізації цукру, яка може призвести до появи грубого присмаку в роті та небажаної текстури печива. Крім цього, сенсорні відчуття людини від печива нерозривно пов'язані з його вологістю. Вологість впливає на такі характеристики, як хрусткість, розжовуваність та загальне відчуття у роті. Органолептичний аналіз показує, що ідеальний баланс вмісту вологи покращує смакові якості, роблячи печиво більш приємним для споживачів.

Масова частка вологи має також великий вплив на термін тривалості готового печива. Наявність надмірної вологи виробів створює сприятливі умови для розвитку мікроорганізмів і пришвидшує ферментативні хімічні реакції. Масова частка вологи розробленого низькобілкового печива наведена в таблиці 6.1.2.

Таблиця 6.1.2. Фізико-хімічні та структурні показники розробленого низько білкового печива

| Печиво виготовлене за рецептурою | Показники               |                  |             | Вміст фенілаланіну, мг |
|----------------------------------|-------------------------|------------------|-------------|------------------------|
|                                  | Масова частка вологи, % | Намочуваність, % | Міцність, Н |                        |
| 1.1.                             | 3.8                     | 90               | 7.8         | 42.1                   |
| 1.2.                             | 4.4                     | 114              | 8.8         | 42.2                   |
| 1.3                              | 6.8                     | 140              | 9.8         | 42.4                   |
| 1.4                              | 10.8                    | 165              | 9.7         | 42.3                   |
| 1.5                              | 8.7                     | 135              | 9.8         | 42.2                   |

|     |      |     |     |      |
|-----|------|-----|-----|------|
| 2.1 | 4.66 | 192 | 5.8 | 8.9  |
| 2.2 | 4.7  | 124 | 7.8 | 8.8  |
| 2.3 | 4.83 | 135 | 7.2 | 8.7  |
| 2.4 | 5.02 | 130 | 7.2 | 8.9  |
| 3.1 | 6.2  | 202 | 4.8 | 9    |
| 3.2 | 6.5  | 270 | 2.2 | 8.8  |
| 3.3 | 6.3  | 300 | 1.5 | 9    |
| 4.1 | 4.5  | 164 | 2.3 | 72.5 |
| 4.2 | 4.7  | 151 | 2.2 | 72.2 |
| 4.3 | 4.5  | 179 | 2.4 | 73.1 |
| 4.4 | 4.8  | 172 | 5.8 | 8.7  |
| 4.5 | 6.2  | 270 | 2.2 | 8.7  |

Готові низькобілкові вироби не пересушені, не дивлячись на те, що низькобілкове печиво має більшу тривалість випікання порівняно з традиційним здобним печивом виготовленим з використанням пшеничного борошна. З таблиці 6.1.2 видно, що зі збільшенням кількості структуроутворювачів збільшується кількість масової частки вологи виробів. Це пов'язано зі здатністю структуроутворювачів (камеді ксантану, гуару та карбоксиметилцеллюлози) утримувати вологу. Зразки виготовлені з частковою заміною кукурудзяного крохмалю на тапіоковий мають вищу вологість порівняно зі зразками виготовленими з кукурудзяним та картопляним крохмалю. Згідно ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови» здобне печиво має масову частку вологи не більше 16%, таким чином за цим показником всі досліджені зразки відповідають діючим вимогам стандарту.

Намочуваність це важливий показник якості готового печива, оскільки він характеризує здатність печива поглинати і утримувати воду. Печиво з високою намочуваністю забезпечує приємні сенсорні відчуття під час його розжовування. Під час намочування відбувається гідратація крохмалю, гідроколідів та білків, що призводить до утворення желатиноподібної структури. Це зміцнює структуру та поліпшує жувальні якості печива, забезпечуючи приємний смаковий досвід споживачів. За рахунок

обмеженого вмісту білків у низькобілковому печиві необхідна намочуваність такого печива забезпечується за рахунок поєднання крохмалів і гідроколоїдів (табл. 6.1.2)

Вироби виготовлені з використанням тапіокового крохмалю мають найбільшу намочуваність. Зі збільшенням вмісту тапіокового крохмалю намочуваність низькобілкового печива також збільшується. Найбільшу намочуваність 300% мають вироби, у яких 35% кукурудзяного крохмалю замінено на тапіоковий. За отриманими даними ми можемо зробити висновок, що наявність мальтодекстрину та структуроутворювачів також позитивно впливає на намочуваність готових виробів, але цей вплив не так яскраво виражений як вплив тапіокового крохмалю. Найменшу намочуваність мають вироби виготовлені з використанням картопляного крохмалю та структуроутворювачів камеді гуара та карбоксиметилцелюлози. Таким чином, кукурудзяний крохмаль краще підходить для виробництва низькобілкового печива.

Міцність печива не нормується у нормативно-технічній документації, проте є важливим показником що свідчить про твердість печива. Вироби з високою міцністю часто сприймаються споживачами як тверді, проте вони гарно зберігаються під час транспортування. Одночасно з чим, вироби з дуже низькою міцністю легко ламаються, мають крихку консистенцію і потребують додаткового пакування.

Вироби виготовлені з використанням кукурудзяного крохмалю мають вищу міцність (табл. 6.1.2). Також зі збільшенням загального вмісту структуроутворювачів міцність виробів також збільшується. Вироби з використанням картопляного крохмалю тверді, висока міцність виробів ускладнює їх кусання, що негативно впливає на сенсорні відчуття споживача. Вироби виготовлені з використанням тапіокового крохмалю мають меншу міцність. За результатами наведеними в таблиці 6.1.2 ми також можемо відслідкувати тренд, що додавання тапіокового крохмалю знижує

міцність, що позитивно впливає на сенсорні відчуття про споживанні таких виробів. Низькобілкове печиво виготовлене з використанням кукурудзяного крохмалю і невеликої кількості борошна мають також не високу міцність (2.2...2.4 н). Проте варто зазначити, що вироби з невеликою міцністю можуть легко ламатись, тому їх доцільно пакувати таким чином, щоб вироби були захищені від механічних пошкоджень при транспортуванні.

Вміст фенілаланіну низькобілкового печива є ключовим показником для хворих на фенілкетонурію, оскільки вони мають постійно обмежувати його споживання. Дієтотерапія і безпечні рівні споживання фенілаланіну описано у розділі 1. Вміст фенілаланіну розроблених низькобілкових виробів наведено в таблиці 6.1.2.

Вміст фенілаланіну прямо пропорційно залежить від сировини, що використовувалась у виробництві низькобілкового печива. У зразках, розроблених на першому етапі досліджень (рецептури 1.1-1.5) застосовувалась невелика кількість пшеничного борошна, що містить у своєму складі білки, і відповідно фенілаланін. Тому вміст фенілаланіну склав 42.1 ... 42.4 мг на 100 г готових виробів. Вироби виготовлені на другому і третьому етапі розробки низькобілкових виробів (рецептури 2.1-2.4 та 3.1-3.3) не містять борошна, крім цього, для виробництва цих виробів використовували очищений крохмаль, з вмістом білків близьким до 0. Єдиним джерелом білка є вершкове масло, що містить у своєму до 0,4 г білка на 100 г продукту. Таким чином вміст фенілаланіну готових виробів становить 8.7 ... 9.0 мг на 100 г готових виробів. У виробах виготовлених за рецептурами 4.1, 4.2 та 4.3 вміст фенілаланіну найбільший (72.2...73.1 мг на 100 г виробів). Це пояснюється найбільшою кількістю борошна у цих виробах. Проте це значення невелике і допустимо для вживання хворими на фенілкетонурію. Вироби виготовлені за рецептурами 4.4 і 4.5 мають схожий вміст фенілаланіну (8.7...8.8 мг на 100 г продукту) до виробів розроблених у другому і третьому блоці досліджень.

Згідно з даними літературних джерел, описаними у розділі 1, всі розроблені низькобілкові вироби можна споживати хворим на фенілкетонурію, при цьому при споживанні виробів виготовлених за рецептурами 4.1-4.3 пацієнтам з формою фенілкетонурії, що не піддається ферментній терапії доцільно рахувати вміст фенілаланіну спожитий разом з таким низькобілковим печивом.

Лужність печива характеризує ступінь розкладання хімічних розпушувачів що входять до рецептурного складу печива під час термічної обробки. Лужність розробленого низькобілкового печива складає 0.4 ... 0.6, що свідчить про високий ступінь розкладання розпушувачів у процесі випікання-сушіння.

## **6.2 Дослідження впливу крохмальної сировини на сорбційно-десорбційні властивості низькобілкового печива**

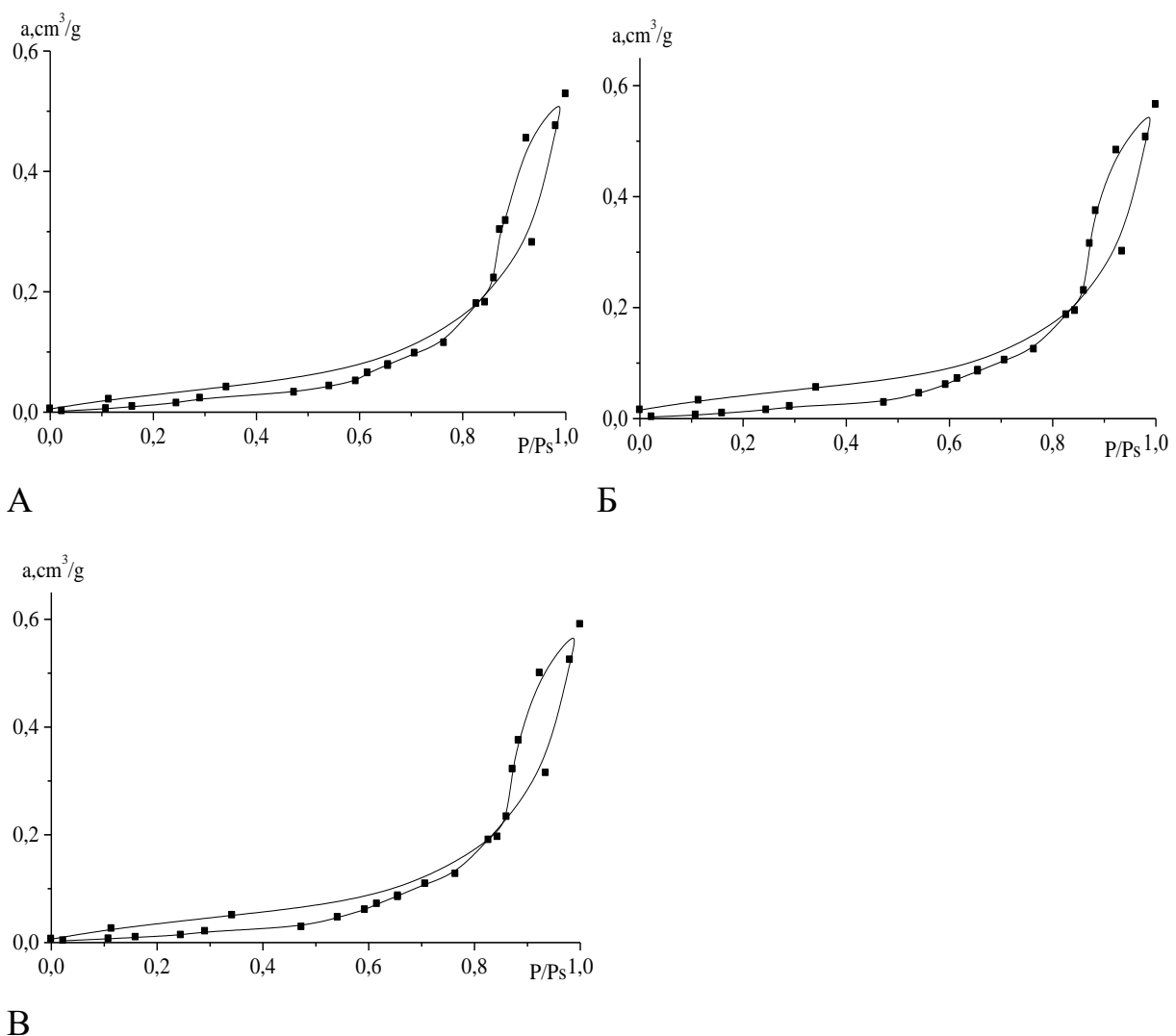
При розробленні нових видів борошняних кондитерських виробів, з метою збереження їх якості протягом всього гарантійного терміну зберігання, необхідно враховувати процеси, які відбуваються у виробі за цей час. До таких процесів відносяться: мікробіологічне псування, окиснення ліпідного комплексу та сорбційно-десорбційні властивості виробу [154].

При оцінці якості та термінів придатності харчових продуктів одним із визначальних фізико-хімічних показників є доступність води для розвитку мікроорганізмів, яка називається активністю води. За даним показником класичне здобне печиво відноситься до виробів із низькою вологістю ( $a_w$  менше 0,65, вологість менше 12,0%), в яких активність мікроорганізмів пригнічена [161].

Відомо, що для класичного здобного печива властиве активне поглинання вологи з навколишнього середовища у зв'язку з чим спостерігається зміна його структури, втрата крихкості виробу. [135]. Тому виникає необхідність дослідження сорбційно-десорбційних властивостей

розроблених зразків безглютенового здобного печива для прогнозування їх поведінки під час зберігання.

З цією метою було проведення визначення сорбційних і десорбційних властивостей зразків низькобілкового печива на основі кукурудзяного крохмалю (рецептура 2.3), кукурудзяного крохмалю із мальтодекстрином (рецептура 2.1) та комбінації кукурудзяного крохмалю з тапіоковим крохмалем та мальтодекстрином (рецептура 3.2). Дослідження проводилося гравіметричним методом на сорбційно-вакуумній установці Мак-Бена [159].



**Рис. 6.2.1 – Ізотерми адсорбції – десорбції води зразками безглютенового печива на основі: А) кукурудзяного крохмалю; Б) комбінації кукурудзяного крохмалю та мальтодекстрину; В) комбінації кукурудзяного та тапіокового крохмалів та мальтодекстрину**

Ізотерми адсорбції-десорбції водяної пари досліджуваними зразками печива представлені графічно на рис. 6.2.1, де  $a$  - кількість адсорбованої вологи, а  $P/P_s$  – відносний рівноважний тиск парів.

На основі результатів представлених на рис. 6.2.1 можна відмітити, що ізотерми сорбції досліджуваних зразків печива мають сигмоподібну форму і за класифікацією БЕТ відповідають ізотермам II типу, для яких характерна полімолекулярна адсорбція [104]. Сигмоподібна форма кривої є найпоширенішим типом ізотерми для харчових продуктів і характерна для матеріалів, що містять високомолекулярні речовини, серед яких є полісахариди [107]. Для всіх зразків печива ізотерми сорбції-десорбції мають ідентичний характер з наявною петлею гістерезису. Варто відмітити, що всі ізотерми досліджуваних зразків мають близьку за значеннями висоту, що свідчить про схожі властивості розроблених видів печива поглинати вологу.

Однак, варто відмітити, що використання в рецептурі мальтодекстрину та тапіокового крохмалю сприяло дещо підвищенню сорбційних властивостей виробів. Згідно літературних джерел [41] це пояснюється різницею у фізичній структурі крохмальних гранул і структурному розташуванні сорбованої води. Відомо [152], що крохмаль є сумішшю двох гомополісахаридів: лінійної амілози та розгалуженого амілопектину, а в молекулах полісахаридів найбільш реакційноздатною є спиртова –ОН група біля 6 атому карбону, що приєднує бокові ланцюги. Відповідно, більшу кількість вологи приєднуватиме той крохмаль, який матиме в складі більшу частку розгалуженого амілопектину із більшою часткою реакційноздатних –ОН груп. Наявність в складі кукурудзяного крохмалю 20...28% амілози, а в тапіоковому крохмалі – 16-17% амілози і пояснює вищі сорбційні властивості останнього. Окрім того, зниження водопоглинальної здатності кукурудзяного крохмалю спричинено

адсорбованим на поверхні крохмальних зерен жиром, який перешкоджає взаємодії гідроксильних груп молекули крохмалю з молекулами води [159].

Також ці припущення підтверджуються дослідженнями, які були проведені науковцями по визначенню сорбційних властивостей кукурудзяного, тапіокового крохмалю та мальтодекстрину [41] і встановлено, що в стані насичення (при  $a_w=1,0$ ) ними поглинається 0,4 г/см<sup>3</sup>, 0,45 г/см<sup>3</sup> та 0,53 г/см<sup>3</sup> вологи відповідно.

З метою інтерпретації ізотерм сорбції розроблених зразків безглютенового печива запропоновано поділити їх на три зони: I зона - відповідає  $a_w = 0,00 - 0,25$ , яка показує кількість адсорбованої вологи в моношарі ; II зона - відповідає  $a_w = 0,26 - 0,75$ , яка показує кількість адсорбованої вологи в полішарі та III зона - відповідає  $a_w = 0,76 - 1,0$ , яка показує кількість адсорбованої вологи в гігроскопічному стані [151].

**Таблиця 6.2.1- Кількість адсорбованої вологи досліджуваними зразками безглютенового печива**

| Зразок печива на основі                                  | Кількість адсорбованої вологи, см <sup>3</sup> /г |                                       |                                      | Залишкова вологи після десорбції, см <sup>3</sup> /г |
|--|---|---------------------------------------|--------------------------------------|--|
|  | Перша зона<br>$a_w = 0,00 \dots 0,25$             | Друга зона<br>$a_w = 0,26 \dots 0,75$ | Третя зона<br>$a_w = 0,76 \dots 1,0$ |  |
| Кукурудзяного крохмалю                                   | 0,0149  | 0,1001                                | 0,4135                               | 0,0052   |
| Кукурудзяного крохмалю з мальтодекстрином                | 0,0155  | 0,1093                                | 0,4410                               | 0,0155   |
| Кукурудзяного та тапіокового крохмалю з мальтодекстрином | 0,0158  | 0,1135                                | 0,4633                               | 0,0063   |

Аналіз ізотерми сорбції показує, що для всіх розроблених зразків печива процес насичення мономолекулярного шару відбувається досить повільно. Дана область представляє міцно зв'язану воду з ентальпією випаровування, значно вищою, ніж у чистої води. Типовим випадком є сорбція води на поверхні високогідрофільних біополімерів, таких як білки та полісахариди з утворенням водневих зв'язків. Вміст вологи теоретично являє собою адсорбцію першим шаром продукту молекул води [3].

Друга зона характеризується підйомом кривої адсорбції. Це пояснюється тим, що після насичення всіх доступних активних центрів молекули сорбата заповнюють практично весь вільний об'єм. Потім під дією тиску набухання відбувається розрив водневих і диполь-дипольних зв'язків макромолекул, тобто утворення нових центрів сорбції води і подальше розкладання полімеру, що викликає поступовий перехід зі склоподібного у високоеластичний стан в області перегину ізотерми.

В даному діапазоні активності вологи найменш сорбційну здатність проявляє зразок на основі кукурудзяного крохмалю - 0,1001 см<sup>3</sup>/г. Використання мальтодекстрину та його комбінації з тапіоковим крохмалем забезпечило підвищення водопоглинальної здатності на 9,2% та 13,4% відповідно. На нашу думку, це можна пояснити більш розгалуженою структурою тапіокового крохмалю, що, відповідно, сприятиме утворенню більшої кількості центрів сорбції вологи. Підвищення ж сорбційних властивостей безглютенового печива з використанням мальтодекстрину можна пояснити наявністю окрім високомолекулярних декстринів молекул мальтози та глюкози, які при підвищенні вологи починають розчинятися, забезпечуючи при цьому проникнення вологи до центральних шарів зразка.

Така ж тенденція зберігається і до накопичення вологи розробленими зразками у гігроскопічному стані, де сорбція протікає з утворенням агрегатів молекул води (кластерів), процес супроводжується структурними змінами і інтенсивним набуханням полімерів крохмалів та крохмалепродукту. Так, для

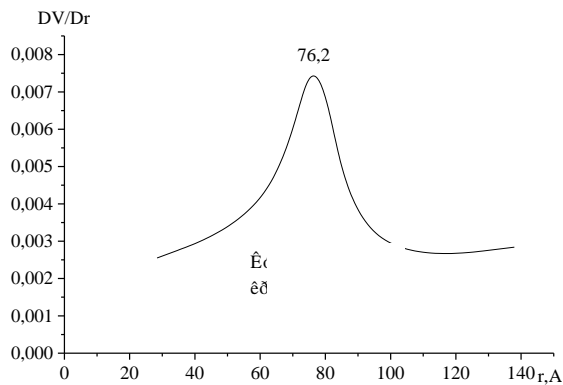
зразку на основі кукурудзяного крохмалю кількість поглинутої вологи в даному діапазоні становить - 0,4135 см<sup>3</sup>/г, з додаванням мальтодекстрину - 0,4410 см<sup>3</sup>/г, з внесенням мальтодекстрину та тапіокового крохмалю - 0,4633 см<sup>3</sup>/г.

Аналізуючи отримані ізотерми можна відмітити, петля гістерезису охоплює весь інтервал рівноважних тисків пари та є однаковою для всіх видів печива що для всіх розроблених зразків. З рис 6.2.1 видно, що ізотерми десорбції розміщені вище ізотерм сорбції, що вказує на наявність хемосорбції, тобто після процесу десорбції у зразках залишається незначна частина адсорбованої вологи, яка є хімічно зв'язана із продуктом [154].

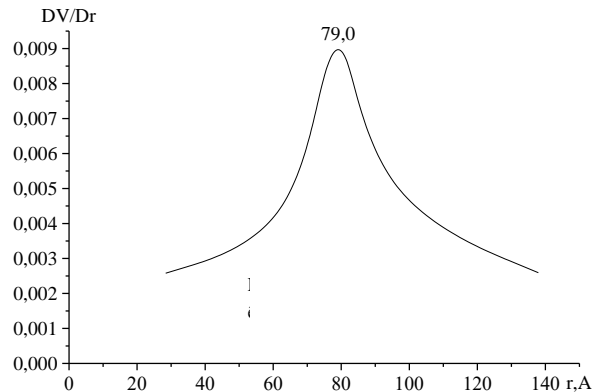
Враховуючи те, що для класичного здобного печива притаманна сорбція вологи з навколишнього середовища для прогнозування поведінки низькобілкового печива при зберіганні необхідним є встановлення рівноважної вологості розроблених зразків печива за відносної вологості повітря, при якій необхідно зберігати дану продукцію згідно вимог нормативної документації. При відносній вологості повітря 75% рівноважний вологовміст зразка на основі кукурудзяного крохмалю становив 11,5%, з додаванням мальтодекстрину – 12,4%, з внесенням мальтодекстрину та тапіокового крохмалю – 12,7%. Маючи масову частку вологи даних виробів у діапазоні 6-8 % можна зробити висновок, що при даних умовах зберігання розроблені зразки печива будуть активно сорбувати вологу з навколишнього середовища до моменту досягнення ними рівноважного стану, що провокуватиме погіршення органолептичних показників виробу та підвищить імовірність мікробіологічного псування. З цією метою, для збереження якості виробів протягом всього терміну зберігання, необхідно одразу після охолодження їх пакувати у водо- та світлонепроникні пакувальні матеріали.

Важливими показниками, які характеризують кінетику адсорбційного процесу є її поверхневі властивості досліджуваних зразків, до яких

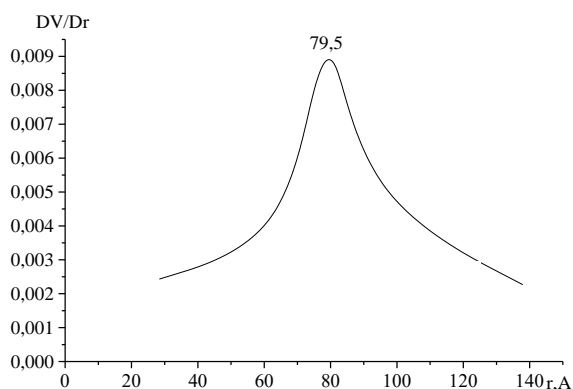
відносяться значення питомої адсорбційної поверхні зразків (S) , їх сорбційний об'єм пор (Vs) та середній діаметр пор низькобілкового печива (D). Ці значення були отримані на основі експериментальних ізотерм сорбції-десорбції по методу молекулярної теорії адсорбції парів Брунауера, Еммета і Теллера (метод БЕТ).



А



Б



В

**Рис. 6.2.2 – Розподіл пор за радіусом у зразках низькобілкового печива на основі: А) кукурудзяного крохмалю; Б) комбінації кукурудзяного крохмалю та мальтодекстрину; В) комбінації кукурудзяного та тапіокового крохмалів та мальтодекстрину**

Згідно з даними представленими на рис.2 видно, що пори в зразку на основі кукурудзяного крохмалю в своєму піку мають найменший діаметр – 76,2 ангстрем, використання ж мальтодекстрину та тапіокового крохмалю сприяло певному підвищенню даного показника [154].

**Таблиця 6.2.2 - Структурні характеристики зразків, які були зняті у парах води**

| Зразок   | $S, \text{м}^2/\text{г}$ | $V_s, \text{см}^3/\text{г}$ | D, А | $R^2$  |
|--|--------------------------|-----------------------------|------|--------|
| печива на основі кукурудзяного крохмалю                  | 110                      | 0,53                        | 193  | 0,5008 |
| кукурудзяного крохмалю з мальтодекстрином                | 111                      | 0,57                        | 205  | 0,5963 |
| кукурудзяного та тапіокового крохмалю з мальтодекстрином | 101                      | 0,59                        | 233  | 0,7092 |

$S, \text{м}^2/\text{г}$  – питома адсорбційна поверхня зразків (моношар)

$V_s, \text{см}^3/\text{г}$  – сорбційний об’єм пор зразків (найбільша кількість води, яку може взяти зразок при 20 °С з тиском 17,54 ммрс)

D, А – середній діаметр пор

$R^2$  – квадрат похибки розрахунку адсорбційної поверхні

Згідно експериментальних даних видно, що використання тапіокового крохмалю сприятиме зниженню питомої поверхні та збільшенню сорбційного об’єму та діаметру пор виробів.

Згідно класифікації прийнятої Міжнародним союзом з теоретичної та прикладної хімії (IUPAC) [160] пори діляться на три типи:

- мікропори - з шириною до 20 А
- мезопори - з шириною від 20 до 500 А
- макропори - з шириною більше 500 А

З отриманих даних, представлених на табл. 2 можна відмітити, що усі зразки печива мають мезопори, для яких характерна полімолекулярна адсорбція, яка зі збільшенням тиску закінчується капілярною конденсацією. Отримані результати корелюють із значеннями рівноважної вологості зразків у всіх зонах ізотерм адсорбції.

Згідно результатів, які представлені на рис. 1 та таблиці 2 можна зробити висновок, що дані зразки мають схожу адсорбційну структуру, оскільки ізотерми адсорбції подібні за формою та розмірами. Однак, відмічене певне збільшення асорбованої вологи зразком із використанням тапіокового крохмалю, що, на нашу думку, можна пояснити його вищою комплексоутворюючою зданістю із молекулами води.

На основі вивчення поверхневих характеристик дослідних зразків низькобілкового печива можна відмітити, що відмінність середнього розміру пор буде впливати не лише на водо поглинальні властивості виробів, але й на структурну характеристики виробів, а саме на їх крихкість.

### **6.3. Особливості технології низькобілкового печива, розрахунок енергетичної цінності та відпускної ціни**

Розроблені найменування низькобілкового печива пропонується виготовляти за існуючою схемою та обладнанні з урахуванням відмінностей у підготовці сировини до виробництва, приготування напівфабрикатів, технологічних параметрів термооброблення.

Технологія низько білкового печива має наступні технологічні етапи:

- підготовка сировини до виробництва,
- приготування емульсії,
- замішування тіста,
- формування тістових заготовок,
- випікання-сушіння,
- охолодження.
- пакування.

Приготування емульсії. Приготування емульсії має важливе значення для досягнення високої якості низькобілкового тіста. В розроблених рецептурах не використовуються емульгатори для стабілізації емульсій. Це здійснено з метою досягнення «cleanlabel». У разі виготовлення емульсії без застосування структуроутворювача (каміді ксантану) спостерігається

швидко їх розшарування, що обумовлює негайне використання після приготування. В цьому разі кількість емульсії, що виготовляється може бути на один заміс (одне завантаження тістомісильної машини). Застосування каміді ксантану в емульсії сприяє утворенню більш високодисперсної емульсії і, відповідно, підвищує її стабільність.

#### Замішування тіста.

Визначення реологічних показників тістових мас розробленого низько білкового печива показали можливість замішування тіста на існуючому обладнанні.

Формування тістових заготовок . Встановлено, що наявність в рецептурах камеді ксантану, каміді гуару, карбоксиметилцелюлози спричиняє збільшення співвідношення висоти до діаметра. При збільшенні вмісту тапіокового крохмалю співвідношення висоти до діаметра суттєво збільшується, таким чином тапіоковий крохмаль призводить до розтікання тістових заготовок (застосування тапіокового крохмалю обумовлено органолептичними показниками печива). Це потрібно враховувати під час визначення відстані між відформованими тістовими заготовками.

#### Випікання-сушіння

Раціональні параметри термооброблення низькобілкового печива становлять 10 хвилин при температурі 220°C, що на 4 хвилини довше порівняно з тепловою обробкою традиційного здобного печива.

Охолодження. Після термооброблення низько білкове печива, як і традиційні види печива, має високу температуру, що обумовлює необхідність його охолодження.

Пакування. З метою збереження якісних показників низькобілкового печива його рекомендовано упаковувати у вологонепроникну упаковку.

Розраховано енергетичну цінність для виробів, виготовленими за рецептурами, що були затверджені дегустаційною комісією СГДК. Вона дорівнює:

- Печиво низькобікове «Ванільна фантазія» –497 ккал,
- Печиво низькобікове «Ванільна мрія» –493 ккал,
- Печиво низькобікове «Шокаладна фантазія» –462 ккал,
- Печиво ТМ Delicia здобне «Кукурудзяне» – 486 ккал,
- Печиво ТМ Вигода здобне «Ведмедик» – 452 ккал.

За результатами розрахунку видно, що калорійність розробленого низькобілкового печива наближена до калорійності традиційного здобного печива.

Останнім етапом у роботі над удосконаленням технології низькобілкового печива був розрахунок собівартості і відпускної ціни низькобілкового печива з метою визначення економічного ефекту. Низькобікове печиво буде мати вартість значно більшу за вартість традиційного здобного печива. Однак хворі на фенілкетонурію не можуть споживати традиційні борошняні кондитерські вироби. Варто зазначити, що на сьогодні хворі на фенілкетонурію споживають низькобікові борошняні кондитерські вироби, що виготовляються за кордоном. Таким чином транспортування цих виробів також впливає на відпускну ціну. За умови впровадження у виробництва розроблених найменувань низькобілкового печива ціна готових виробів зменшується. Для порівняння, відпускну ціну за 1 кг розробленого та імпортного низькобілкового печива і традиційного здобного печива:

- Печиво низькобікове «Ванільна фантазія» – 647 грн,
- Печиво низькобікове «Ванільна мрія» – 580 грн,
- Печиво низькобікове «Шокаладна фантазія» – 619 грн,
- Печиво ТМ Delicia здобне «Кукурудзяне» – 159 грн,
- Печиво ТМ Вигода здобне «Ведмедик» – 167 грн,
- Печиво низькобікове ТМ Bezgluten «Масляне» – 860 грн,
- Печиво низькобікове ТМ Balviten «Бісквітне» –1133 грн.

Найбільше на ціну низькобілкових виробів впливає рецептурний склад виробів. Під час розробки низькобілкових виробів ми використовували сировину широко доступну в Україні. Нами було розраховано ціну низькобілкових виробів, виготовленими за рецептурами затвердженими дегустаційною комісією СГДК.

При порівнянні цін на традиційне і низькобілкове печиво ми бачимо, що низькобілкове печиво дорожче порівняно з традиційним печивом. В першу чергу це пов'язано за вартістю крохмалю, ціна якого майже в 4 рази вища за ціну пшеничного борошна яке використовується в традиційному здобному печиві.

Варто зазначити, що у своїх розрахунках ми використовували ціну звичайних широкодоступних кукурудзяного та тапіокового крохмалів з вмістом білків до 0,4% білка. У разі використання високо очищених крохмалів з вмістом білків  $\approx 0$  ціна сировини буде підвищуватись.

### **Висновки до розділу 6**

1. Порівняно органолептичні показники низькобілкового печива розробленого на всіх 4 етапах дослідження, наведена відповідність розроблених виробів вимогам діючої нормативної документації.

2. Встановлено, що зміна геометричних розмірів низько білкового печива під час термічної обробки відрізняється від традиційного – збільшення діаметру, розтікання тістової заготовки. Важливо враховувати ці зміни при налаштуванні формуючого обладнання. Аналіз таблиці геометричних змін виробів до і після випікання вказує на те, що деякі компоненти рецептури, такі як структуроутворювачі та тапіоковий крохмаль, мають суттєвий вплив на співвідношення висоти до діаметра. Тапіоковий крохмаль зменшує відношення висоти до діаметра, а структуроутворювачі збільшують це відношення.

3. Розроблені вироби за фізико-хімічними показниками відповідають вимогам ДСТУ 3781:2014 «Печиво. Загальні технічні умови». Зі

збільшенням кількості структуроутворювачів збільшується кількість масової частки вологи виробів. Зразки виготовлені з частковою заміною кукурудзяного крохмалю на тапіоковий мають вищу вологість порівняно зі зразками виготовленими з кукурудзяним та картопляним крохмалю.

4. Вироби виготовлені з використанням тапіокового крохмалю мають найбільшу намоchuваність. Зі збільшенням вмісту тапіокового крохмалю намоchuваність низькобілкового печива також збільшується. Наявність мальтодекстрину та структуроутворювачів також позитивно впливає на намоchuваність готових виробів.

5. Вироби з кукурудзяним крохмалем відзначаються вищою міцністю. Зростання вмісту структуроутворювачів також збільшує міцність виробів. Застосування картопляного крохмалю призводить до твердості виробів, що може ускладнити їх кусання та негативно впливати на споживчі відчуття. Додавання тапіокового крохмалю виявилось ефективним зниженням міцності, сприяючи поліпшенню сенсорних характеристик. Продукти з низькою міцністю слід упаковувати з урахуванням їхньої вразливості при транспортуванні.

6. Вміст фенілаланну всіх розроблених виробів залежить від сировини, що використовується для виробництва цих виробів, і складає від 8.7 до 73.2 мг фенілаланіну на 100 г виробів. Всі розроблені низькобілкові вироби можна споживати хворим на фенілкетонурію, при цьому при споживанні виробів виготовлених за рецептурами 4.1-4.3 пацієнтам з формою фенілкетонурії, що не піддається ферментній терапії доцільно рахувати вміст фенілаланіну спожитий разом з таким низькобілковим печивом.

7. За ізотермами сорбції що мають сигмоподібну форму ми можемо зробити висновок, що дослідженому низькобілковому печиву властива полімолекулярна адсорбція. Використання тапіокового крохмалю сприятиме зниженню питомої поверхні та збільшенню сорбційного об'єму

та діаметру пор виробів. Рівноважна вологість при відносній вологості повітря 75% для зразка на основі кукурудзяного крохмалю становить 11,5%, з додаванням мальтодекстрину – 12,4%, з внесенням мальтодекстрину та тапіокового крохмалю – 12,7%. Низькобілкові вироби рекомендовано пакувати в герметичну упаковку для запобігання активного поглинання вологи з навколишнього середовища та подовження терміну зберігання.

8. Представлено до дегустації СГДК та затверджено рецептури і технологічні інструкції на три найменування розробленого низькобілкового печива «Ванільна фантазія», «Ванільна мрія» та «Шоколадна фантазія», розраховано роздрібну ціну за 1 кг низько білкового.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу інформаційних джерел розглянута проблематика фенілкетонурії, включаючи її розповсюдження, симптоматику та методи лікування, зокрема дієтотерапію; проаналізовано ринок низькобілкових виробів для людей із фенілкетонурією та наукові публікації, що стосуються розробки таких продуктів, визначено доцільність розроблення низькобілкового печива та впровадження у виробництво в Україні.

2. Літературний огляд свідчить про відсутність докладних публікацій з розробки рецептур низькобілкового печива та відсутність даних про його структурно-механічні та реологічні властивості. При виборі компонентів для подальшого дослідження технології низькобілкового печива обрано гідроколоїди (камедь ксантану, камедь гуару, карбоксиметилцеллюлозу) та крохмалі (картопляний, кукурудзяний, тапіоковий) з метою вдосконалення якості та харчових властивостей продукту.

3. Проведено чотири етапи розробки низькобілкового печива, використовуючи кукурудзяний, картопляний та тапіоковий крохмалі, а також структуроутворювачі, такі як карбоксиметилцеллюлоза, камедь ксантану та гуару. Визначено ГНЗ та зміни геометричних розмірів печива під час випікання-сушіння, а також проведено органолептичні оцінки готової продукції. Вибрано вироби для подальших досліджень.

Розраховано модель ідеального продукту для дітей різного віку та розроблено п'ять рецептур, орієнтованих на цю модель. З метою покращення нутрієнтного складу в рецептурах використовується кукурудзяна олія, морквяне пюре та резистентний крохмаль.

4. У результаті дослідження властивостей низькобілкових емульсій встановлено, що їхні криві в'язкості виявляються типовими для зсувного потоншення, що є характерним для псевдопластичних рідин. Емульсія, у якій міститься камедь ксантану, проявляє найвищу в'язкість, тоді як заміна частини вершкового масла кукурудзяною олією призводить до зниження

в'язкості. Бульбашки диспергованої фази емульсії, до складу яких не вносились структуроутворювачі, характеризуються неоднорідністю за розміром, досягаючи 160 мікрон. З цього приводу рекомендується збільшити швидкість збивання емульсії під час приготування для розбиття відносно великих бульбашок на менші, з метою досягнення більш однорідної консистенції.

Модулі в'язкості (втрат) низькобілкового тіста нижчі порівняно з модулями втрат порівняно традиційного здобного тіста. При цьому у всіх досліджених зразках модулі пружності перевищують модулі втрат, а криві не перетинаються, що свідчить про відсутність текучості матеріалу. Це дозволяє зробити висновок, що розроблені низькобілкові вироби ефективно формуються методом виїмного методу.

Значення комплексної в'язкості тістових мас розроблених низькобілкових виробів знаходяться в одному діапазоні з комплексною в'язкістю тіста для традиційного здобного печива, що підтверджує можливість виробництва низькобілкового печива на існуючому обладнанні.

Аналіз альвеографічних досліджень підтверджує відсутність еластичності у низькобілковому тісті. Додавання тапіокового крохмалю до рецептури низькобілкового печива призводить до збільшення індексу розтяжності тіста майже вдвічі, полегшуючи процес формування рівномірного шару тіста без тріщин.

Досліджені зразки низькобілкового тіста та тіста для здобного печива проявляють виражені пластичні властивості, що перевищують еластичні. Зразки тіста деформуються під дією сили і не повністю відновлюють свою форму. Коефіцієнти відновлення зворотної деформації для низькобілкового тіста знаходяться в діапазоні від 0,385 до 0,525, а для тіста для традиційного здобного печива - 0,490.

Наявність у рецептурах низькобілкового тіста мальтодекстрину та тапіокового крохмалю підвищує пружність тіста: коефіцієнт відновлення

зворотної деформації зростає від 0,385 до 0,499 при додаванні мальтодекстрину, та до 0,525 при додаванні тапіокового крохмалю і мальтодекстрину.

5. Оптимальні тривалість термооброблення низькобілкового печива при температурі 220°C на 40% довше у порівнянні з тривалістю термообробки традиційного здобного печива.

Введення мальтодекстрину у склад низькобілкового тіста для здобного печива сприяє підвищенню видалення вологи під час теплової обробки. Низькобілковий зразок із кукурудзяним крохмалем та ксантановою камеддю втрачає всю розрахункову вологу при температурі 129°C, у той час як низькобілковий зразок із кукурудзяним крохмалем, мальтодекстрином та ксантановою камеддю втрачає розрахункову вологу при 95,4°C, а контрольний зразок - при 98,7°C, як було виміряно за допомогою ТГА (термогравіметричного аналізу).

Введення мальтодекстрину у склад низькобілкового печива призводить до невеликого зменшення енергії, необхідної для випікання: 268,33 Дж/г без мальтодекстрину та 262,01 Дж/г з мальтодекстрином. Заміна 20% кукурудзяного крохмалю на крохмаль тапіоки в рецептурі призводить до значного зниження енергії, необхідної для випікання: зразок із 100% кукурудзяного крохмалю має  $\Delta H=262,01$  Дж/г, зразок із кукурудзяним та тапіоковим крохмалем має  $\Delta H=199,46$  Дж/г.

Для термічної обробки традиційного здобного печива необхідна менша кількість енергії ніж для термічної обробки низькобілкового печива. ( $\Delta H=124,05$  Дж/г та  $\Delta H=199,46 - 268,33$  Дж/г відповідно).

Тістові заготовки низькобілкового печива характеризуються іншим співвідношенням висоти та діаметру (розтікання) під час термооброблення, ніж тістові заготовки традиційного здобного печива. Визначено, що тапіоковий крохмаль зменшує це співвідношення

6. Розроблені найменування низькобілкового печива мають прийнятні органолептичні показники. Зі збільшенням кількості структуроутворювачів зростає масова частка вологи виробів. Однак за органолептичними і фізико-хімічними показниками розроблене низькобілкове печиво відповідає вимогам ДСТУ 3781:2014 "Печиво. Загальні технічні умови".

Вироби, виготовлені з кукурудзяним крохмалем, відзначаються вищою міцністю. Зростання вмісту структуроутворювачів також збільшує міцність виробів. Застосування картопляного крохмалю призводить до твердості виробів, що може ускладнити їх кусання та негативно впливати на споживчі відчуття. Додавання тапіокового крохмалю ефективно знижує міцність, поліпшуючи сенсорні характеристики. Продукти з низькою міцністю слід упаковувати з урахуванням вразливості під час транспортування.

Вміст фенілаланіну у всіх виробках залежить від використовуваної сировини та коливається від 8.7 до 73.2 мг на 100 г виробу. Всі розроблені низькобілкові вироби можуть бути спожиті хворим на фенілкетонурію. При споживанні виробів, виготовлених за певними рецептурами, пацієнти з формою фенілкетонурії, що не піддається ферментній терапії, повинні враховувати вміст фенілаланіну, спожитого разом із таким низькобілковим печивом.

Низькобілковому печиву властива полімолекулярна адсорбція. Використання тапіокового крохмалю сприяє зниженню питомої поверхні та збільшенню сорбційного об'єму та діаметру пор виробів. Рівноважна вологість при відносній вологості повітря 75% для зразка на основі кукурудзяного крохмалю становить 11,5%, з додаванням мальтодекстрину – 12,4%, з внесенням мальтодекстрину та тапіокового крохмалю – 12,7%. Низькобілкові вироби рекомендовано пакувати в герметичну упаковку для запобігання активного поглинання вологи з навколишнього середовища та подовження терміну зберігання.

Представлено до дегустації СГДК та затверджено рецептури і технологічні інструкції на три найменування розробленого низькобілкового печива «Ванільна фантазія», «Ванільна мрія» та «Шоколадна фантазія», розраховано роздрібну ціну за 1 кг низькобілкового.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Acosta, P., Wenz, E., & Williamson, M. (1977). Nutrient intake of treated infants with phenylketonuria. *American Journal of Clinical Nutrition*, 30(2).
2. Ajinomoto Cambrooke. (n.d.). Retrieved from <https://www.cambrooke.com/>
3. Al-Muhtaseb, A., McMinn, W., & Magee, T. (2002). Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review. *Food and Bioproducts Processing: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part C*, 80(2).
4. Anton, A., & Artfield, S. (2008). Hydrocolloids in gluten-free breads: A review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 59(1).
5. Anton, M., Nau, F., & Lechevalier, V. (2009, 1). Egg proteins. In *Handbook of Hydrocolloids: Second Edition* (pp. 359-382). Woodhead Publishing.
6. Ashe, K., Kelso, W., Farrand, S., Panetta, J., Fazio, T., De Jong, G., & Walterfang, M. (2019). Psychiatric and Cognitive Aspects of Phenylketonuria: The Limitations of Diet and Promise of New Treatments. *Frontiers in Psychiatry*, 10.
7. Baltasvias, A., Jurgens, A., & Van Vliet, T. (1997). Rheological properties of short doughs at small deformation. *Journal of Cereal Science*, 26(3).
8. Belorio, M., Marcondes, G., & Gómez, M. (2020, 8). Influence of psyllium versus xanthan gum in starch properties. *Food Hydrocolloids*, 105, 105843.
9. BeMiller, J. (2018). *Carbohydrate chemistry for food scientists*.
10. Bilder, D., Kobori, J., Cohen-Pfeffer, J., Johnson, E., Jurecki, E., & Grant, M. (2017). Neuropsychiatric comorbidities in adults with phenylketonuria: A retrospective cohort study. *Molecular Genetics and Metabolism*, 121(1).

11. Bilder, D., Noel, J., Baker, E., Irish, W., Chen, Y., Merilainen, M., . . . Winslow, B. (2016). Systematic Review and Meta-Analysis of Neuropsychiatric Symptoms and Executive Functioning in Adults With Phenylketonuria. *Developmental Neuropsychology*, 41(4).
12. Bloksma, A. (1990). Dough structure, dough rheology, and baking quality. *Cereal Foods World*, 35(2).
13. Burlina, A., & Blau, N. (2009). Effect of BH4 supplementation on phenylalanine tolerance. *Journal of Inherited Metabolic Disease*, 32(1).
14. Cappa, C., Kelly, J., & Ng, P. (2020). Baking performance of 25 edible dry bean powders: Correlation between cookie quality and rapid test indices. *Food Chemistry*, 302.
15. Cauvain, S. (2020). *Breadmaking: Improving Quality: A volume in Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*.
16. Cauvain, S. P. (2023). Chapter 34 - Soft wheat products: cakes and biscuits. In H. K. Peter R. Shewry, *ICC Handbook of 21st Century Cereal Science and Technology* (pp. 327-336). London: Academic Press.
17. Chaisawang, M., & Suphantharika, M. (2006). Pasting and rheological properties of native and anionic tapioca starches as modified by guar gum and xanthan gum. *Food Hydrocolloids*, 20(5).
18. Concolino, D., Mascaro, I., Moricca, M., Bonapace, G., Matalon, K., Trapasso, J., . . . Strisciuglio, P. (2017). Long-term treatment of phenylketonuria with a new medical food containing large neutral amino acids. *European Journal of Clinical Nutrition*, 71(1).
19. Crockett, R., Ie, P., & Vodovotz, Y. (2011). How do xanthan and hydroxypropyl methylcellulose individually affect the physicochemical properties in a model gluten-free dough? *Journal of Food Science*, 76(3).
20. Davidson, I. (2023, 1). Baking process. In I. Davidson, *Biscuit Baking Technology (Third Edition)* (pp. 45-56). Academic Press.

21. *Delifirst - Eiweissarm für PKU, Niereninsuffizienz, Leberzirrhose.* (n.d.). Retrieved from <https://www.delifirst.de/>
22. Díaz-Ramírez, M., Calderón-Domínguez, G., García-Garibay, M., Jiménez-Guzmán, J., Villanueva-Carvajal, A., Salgado-Cruz, M., . . . Del Moral-Ramírez, E. (2016, 12). Effect of whey protein isolate addition on physical, structural and sensory properties of sponge cake. *Food Hydrocolloids*, *61*, 633-639.
23. *Dietary Specialties.* (n.d.). Retrieved from <https://dietspec.com/>
24. Dorokhovych, V., Hrytsevich, M., (2021) Effect of the use of corn, tapioca starches and maltodextrine on water absorption of low-protein cookies for patients with phenylketonuria. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Матеріали 87 Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів.* 15-16 квітня 2021 р., Київ, НУХТ, С. 144.
25. Dorokhovych, V., & Hrytsevich, M. (2022). The use of corn and tapioca starch in the production of low-protein cookies for patients with phenylketonuria. *Scientific Works of National University of Food Technologies*, *28*(3), 144-153. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2020-26-2-19>
26. Dorokhovych V., Hrytsevich M., Bohatyrova Ye (2020) Low protein cookies designing for patients with phenylketonuria based on corn starch. 5th International scientific and practical conference: Eurasian Scientific Congress. 17-19 May 2020, Barcelona, Spain, C. 15-17.
27. Dorokhovych, V., Hrytsevich, M., & Loza, I. (2020). Problems of confectionery products development for patients with phenylketonuria. *Scientific Works of National University of Food Technologies*, *26*(2), 187-194. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2022-28-3-14>
28. *Ener-G Foods: Gluten-Free, Dairy/Soy/Nut-Free, Kosher & Vegan, Non-GMO.* (n.d.). Retrieved from <https://www.ener-g.com/>

29. Enns, G., Koch, R., Brumm, V., Blakely, E., Suter, R., & Jurecki, E. (2010). Suboptimal outcomes in patients with PKU treated early with diet alone: Revisiting the evidence. *Molecular Genetics and Metabolism*, 101(2-3).
30. Esteller, M., Amaral, R., & Da Silva Lannes, S. (2004). Effect of sugar and FAT replacers on the texture of baked goods. *Journal of Texture Studies*, 35(4).
31. *Frida - Food data published by DTU Food*. (n.d.). Retrieved from <https://frida.fooddata.dk/?lang=en>
32. Gawade, D., Patil, K., & Hemangi Jayram, G. (2023, 1). Development of value-added cookies supplemented with giloy and tulsi powder. *Materials Today: Proceedings*, 73, 530-534.
33. Gómez, M. (2022). Gluten-free bakery products: Ingredients and processes. *Advances in Food and Nutrition Research*, 99.
34. Gonzalez-Ortega, R., Rajagukguk, Y., Ferrentino, G., Morozova, K., & Scampicchio, M. (2024, 3). Detection of butter adulteration with palm stearin and coconut oil by differential scanning calorimetry coupled with chemometric data analysis. *Food Control*, 157, 110165.
35. Goranova, Z., Marudova, M., & Baeva, M. (2019, 11). Influence of functional ingredients on starch gelatinization in sponge cake batter. *Food Chemistry*, 297, 124997.
36. Group, S. (2022, 10). *SHS Group | Representing Leading Brands in the UK & Ireland*. Retrieved from <https://www.shs-group.co.uk/>
37. HadiNezhad, M., & Butler, F. (2009). Effect of flour type and dough rheological properties on cookie spread measured dynamically during baking. *Journal of Cereal Science*, 49(2).
38. Harding, C., Amato, R., Stuy, M., Longo, N., Burton, B., Posner, J., . . . Vockley, J. (2018). Pegvaliase for the treatment of phenylketonuria: A pivotal, double-blind randomized discontinuation Phase 3 clinical trial. *Molecular Genetics and Metabolism*, 124(1).

39. *Healthy gluten-free products, low-protein foods: Glutenex.* (n.d.). Retrieved from <https://glutenex.pl/en/>
40. Hedayati, S., Jafari, S., Babajafari, S., Niakousari, M., & Mazloomi, S. (2022). Different food hydrocolloids and biopolymers as egg replacers: A review of their influences on the batter and cake quality. *Food Hydrocolloids*, 128.
41. Hellman, N., Boesch, T., & Melvin, E. (1952). Starch Granule Swelling in Water Vapor Sorption. *Journal of the American Chemical Society*, 74(2).
42. Hillert, A., Anikster, Y., Belanger-Quintana, A., Burlina, A., Burton, B., Carducci, C., . . . Blau, N. (2020). The Genetic Landscape and Epidemiology of Phenylketonuria. *American Journal of Human Genetics*, 107(2).
43. *Home | Fate Special Foods | Low Protein.* (n.d.). Retrieved from <https://www.fatespecialfoods.com/>
44. Hrytsevich, M., Dorokhovych, V. (2023). Influence of the dough composition on the heat treatment of low-protein cookies. *Ukrainian Journal Food Science*, 11(1), 187-194.
45. Irondi, E., Imam, Y., Ajani, E., & Alamu, E. (2023, 10). Natural and modified food hydrocolloids as gluten replacement in baked foods: Functional benefits. *Grain & Oil Science and Technology*.
46. Itagi, H., Sartagoda, K., Gupta, N., Pratap, V., Roy, P., Tiozon, R., . . . Sreenivasulu, N. (2023, 8). Enriched nutraceuticals in gluten-free whole grain rice cookies with alternative sweeteners. *LWT*, 186, 115245.
47. Ito, V., Bet, C., Schnitzler, E., Demiate, I., Lacerda, L., & Soccol, C. (2022, 1). *Thermal analysis of food materials*. Elsevier.
48. Jarvis, G. A. (1953). Phenylpyruvic oligophrenia deficiency of phenylalanine-oxidizing system. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine. Society for Experimental Biology and Medicine (New York, N.Y.)*, 82(3).

49. Kasapis, S., & Bannikova, A. (2017). Chapter 2 - Rheology and food microstructure. In J. Ahmed, & S. Basu, *Advances in Food Rheology and Its Applications (Second Edition)* (pp. 27-62). Woodhead Publishing.
50. Kaur, S., Panesar, P., & Chopra, H. (2023, 8). Extraction of dietary fiber from kinnow (*Citrus reticulata*) peels using sequential ultrasonic and enzymatic treatments and its application in development of cookies. Elsevier.
51. Keil, S., Anjema, K., Van Spronsen, F., Lambruschini, N., Burlina, A., Bélanger-Quintana, A., . . . Blau, N. (2013). *Long-term follow-up and outcome of phenylketonuria patients on sapropterin: A retrospective study* (Vol. 131).
52. Laguna, L., Hernández, M., Salvador, A., & Sanz, T. (2013). Study on Resistant Starch Functionality in Short Dough Biscuits by Oscillatory and Creep and Recovery Tests. *Food and Bioprocess Technology*, 6(5).
53. Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N., & Biliaderis, C. (2007). Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of Food Engineering*, 79(3).
54. Levy, H., Milanowski, A., Chakrapani, A., Cleary, M., Lee, P., Trefz, F., . . . Dorenbaum, A. (2007). *Efficacy of sapropterin dihydrochloride (tetrahydrobiopterin, 6R-BH4) for reduction of phenylalanine concentration in patients with phenylketonuria: a phase III randomised placebo-controlled study* (Vol. 370).
55. Lewis, M. (2023). Chapter 11 - Viscosity measurement. In M. Lewis, *Food Process Engineering Principles and Data* (pp. 81-93). Woodhead Publishing.
56. Liu, J., Feng, H., He, J., Chen, H., & Ding, D. (2018). The effects of nitrogen and water stresses on the nitrogen-to-protein conversion factor of winter wheat. *Agricultural Water Management*, 210.
57. Lukinac, J., Komlenić, D., Čolić, M., Nakov, G., & Jukić, M. (2022). Modelling the browning of bakery products during baking: a review. *Ukrainian Food Journal*, 11(2).

58. MacDonald, A. (2017). Phenylketonuria. In *Reference Module in Life Sciences*. Elsevier.
59. MacLeod, E., Gleason, S., van Calcar, S., & Ney, D. (2009). *Reassessment of phenylalanine tolerance in adults with phenylketonuria is needed as body mass changes* (Vol. 98).
60. Mahan, K., Gandhi, M., & Anand, S. (2019). Pegvaliase: a novel treatment option for adults with phenylketonuria. *Current Medical Research and Opinion*, 35(4).
61. Mancebo, C., San Miguel, M., Martínez, M., & Gómez, M. (2015, 1). Optimisation of rheological properties of gluten-free doughs with HPMC, psyllium and different levels of water. *Journal of Cereal Science*, 61, 8-15.
62. Martínez, M., & Gómez, M. (2017, 3). Rheological and microstructural evolution of the most common gluten-free flours and starches during bread fermentation and baking. *Journal of Food Engineering*, 197, 78-86.
63. McCarthy, D., Gallagher, E., Gormley, T., Schober, T., & Arendt, E. (2005). Application of response surface methodology in the development of gluten-free bread. *Cereal Chemistry*, 82(5).
64. Mohsen, S., Yaseen, A., Ammar, A., & Mohammad, A. (2010). Quality characteristics improvement of low-phenylalanine toast bread. *International Journal of Food Science and Technology*, 45(10).
65. Moreira, R., Chenlo, F., & Arufe, S. (2015, 8). Starch transitions of different gluten free flour doughs determined by dynamic thermal mechanical analysis and differential scanning calorimetry. *Carbohydrate Polymers*, 127, 160-167.
66. Muntau, A., Adams, D., Bélanger-Quintana, A., Bushueva, T., Cerone, R., Chien, Y., . . . Bhattacharya, K. (2019). International best practice for the evaluation of responsiveness to sapropterin dihydrochloride in patients with phenylketonuria. *Molecular Genetics and Metabolism*, 127(1).

67. Muntau, A., Burlina, A., Eyskens, F., Freisinger, P., De Laet, C., Leuzzi, V., . . . Rogoff, D. (2017). *Efficacy, safety and population pharmacokinetics of sapropterin in PKU patients <4 years: results from the SPARK open-label, multicentre, randomized phase IIIb trial* (Vol. 12).
68. Naqash, F., Gani, A., Gani, A., & Masoodi, F. (2017). Gluten-free baking: Combating the challenges - A review. *Trends in Food Science and Technology*, 66.
69. Naseer, B., Naik, H., Hussain, S., Zargar, I., Beenish, Bhat, T., & Nazir, N. (2021). Effect of carboxymethyl cellulose and baking conditions on in-vitro starch digestibility and physico-textural characteristics of low glycemic index gluten-free rice cookies. *LWT*, 141.
70. Nawrocka, A., Szymańska-Chargot, M., Miś, A., Wilczewska, A., & Markiewicz, K. (2017, 8). Effect of dietary fibre polysaccharides on structure and thermal properties of gluten proteins – A study on gluten dough with application of FT-Raman spectroscopy, TGA and DSC. *Food Hydrocolloids*, 69, 410-421.
71. *NHANES - National Health and Nutrition Examination Survey Homepage*. (2020, 10). Retrieved from <http://www.cdc.gov/nchs/nhanes.htm>
72. Ojijo, N., & Shimon, E. (2007). Influence of xanthan gum and tapioca starch on the retrogradation and gelation of finger millet (*Eleusine coracana* L. Gaertner) starch pastes. *Journal of Texture Studies*, 38(1).
73. Özboy, Ö. (2002). Development of corn starch-gum bread for phenylketonuria patients. *Nahrung - Food*, 46(2).
74. Palav, T. (2016, 1). Chemistry of Cake Manufacturing. *Encyclopedia of Food Grains: Second Edition*, 3-4, 367-374.
75. Papantoniou, E., Hammond, E., Scriven, F., Gordon, M., & Schofield, J. (2004). Effects of endogenous flour lipids on the quality of short-dough biscuits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(11).

76. Pareyt, B., & Delcour, J. (2008). The role of wheat flour constituents, sugar, and fat in low moisture cereal based products: A review on sugar-snap cookies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 48(9).
77. Pareyt, B., Brus, K., & Delcour, J. (2009). Sugar-snap cookie dough setting: The impact of sucrose on gluten functionality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(17).
78. Pate, K., & Safier, P. (2016, 1). Chemical metrology methods for CMP quality. *Advances in Chemical Mechanical Planarization (CMP)*, 299-325.
79. Pedersen, L., Kaack, K., Bergsøe, M., & Adler-Nissen, J. (2005). Effects of chemical and enzymatic modification on dough rheology and biscuit characteristics. *Journal of Food Science*, 70(2).
80. *PKU Perspectives*. (n.d.). Retrieved from <https://www.pkuperspectives.com/>
81. *Promin Metabolics*. (n.d.). Retrieved from <https://prominpku.com/>
82. Qu, J., Yang, T., Wang, E., Li, M., Chen, C., Ma, L., . . . Cui, Y. (2019). *Efficacy and safety of sapropterin dihydrochloride in patients with phenylketonuria: A meta-analysis of randomized controlled trials* (Vol. 85).
83. Raninen, K., Lappi, J., Mykkänen, H., & Poutanen, K. (2011). Dietary fiber type reflects physiological functionality: Comparison of grain fiber, inulin, and polydextrose. *Nutrition Reviews*, 69(1).
84. Raymundo, A., Fradinho, P., & Nunes, M. (2014). Effect of Psyllium fibre content on the textural and rheological characteristics of biscuit and biscuit dough. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 3(2).
85. Regier, D., & Greene, C. (2017). Phenylalanine Hydroxylase Deficiency [Updated 2017].
86. Regier, D., Bąk, A., Bausell, H., O'Reilly, E., & Cowser, L. (2022). Starting the conversation on gene therapy for phenylketonuria: Current

perspectives of patients, caregivers, and advocates. *Molecular Genetics and Metabolism Reports*, 31.

87. Rocha, J., Bausell, H., Bélanger-Quintana, A., Bernstein, L., Gökmen-Özel, H., Jung, A., . . . Heddrich-Ellerbrok, M. (2021). Development of a practical dietitian road map for the nutritional management of phenylketonuria (PKU) patients on pegvaliase. *Molecular Genetics and Metabolism Reports*, 28.

88. Roman, L., Belorio, M., & Gomez, M. (2019). Gluten-Free Breads: The Gap Between Research and Commercial Reality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(3).

89. Roman, L., Cal, E., Gomez, M., & Martinez, M. (2018, 9). Specific ratio of A-to B-type wheat starch granules improves the quality of gluten-free breads: Optimizing dough viscosity and pickering stabilization. *Food Hydrocolloids*, 82, 510-518.

90. Roman, L., Reguilon, M., Gomez, M., & Martinez, M. (2020, 3). Intermediate length amylose increases the crumb hardness of rice flour gluten-free breads. *Food Hydrocolloids*, 100, 105451.

91. Rondanelli, M., Porta, F., Gasparri, C., Claude, G., Cavioni, A., Mansueto, F., . . . Perna, S. (2023). A food pyramid for adult patients with phenylketonuria and a systematic review on the current evidences regarding the optimal dietary treatment of adult patients with PKU. *Clinical Nutrition*, 732-763.

92. Rovelli, V., & Longo, N. (2023). Phenylketonuria and the brain. *Molecular Genetics and Metabolism*, 139(1), 107583.

93. Rumińska, W., Markiewicz, K., Wilczewska, A., & Nawrocka, A. (2021, 10). Effect of oil pomaces on thermal properties of model dough and gluten network studied by thermogravimetry and differential scanning calorimetry. *Food Chemistry*, 358, 129882.

94. Sabanis, D., & Tzia, C. (2011). Effect of hydrocolloids on selected properties of gluten-free dough and bread. *Food Science and Technology International*, 17(4).

95. Sahi, S. S. (2008). Chapter 4 Cake Emulsions. In S. Sahin, & S. G. Servet, *Food Engineering Aspects of Baking Sweet Goods* (pp. 81-98). New York: CRC Press.
96. Sanchez, H., Osella, C., & De la Torre, M. (2002). Optimization of gluten-free bread prepared from cornstarch, rice flour, and cassava starch. *Journal of Food Science*, 67(1).
97. Sanz, T., Salvador, A., & Hernández, M. (2023, 1). Creep–recovery and oscillatory rheology of flour-based systems. In *Advances in Food Rheology and Its Applications (Second Edition)* (pp. 459-478). Woodhead Publishing.
98. Schober, T. (2009). Manufacture of Gluten-Free Specialty Breads and Confectionery Products. *Gluten-Free Food Science and Technology*.
99. Schwarzlaff, S., Johnson, J., Barbeau, W., & Duncan, S. (1996). Guar and locust bean gums as partial replacers of all-purpose flour in bread: An objective and sensory evaluation. *Journal of Food Quality*, 19(3).
100. Sciarini, L., Ribotta, P., León, A., & Pérez, G. (2012, 8). Incorporation of several additives into gluten free breads: Effect on dough properties and bread quality. *Journal of Food Engineering*, 111(4), 590-597.
101. Scriver, C., & Kaufman, S. (2001). Hyperphenylalaninemia: phenylalanine hydroxylase deficiency. *The Metabolic and Molecular Bases of Inherited Disease*.
102. Shepherd, I. R. (1976). Chapter 5: Cake Emulsions. In I. R. Shepherd, *Food Emulsions* (pp. 270–274). New York: Ed S. Friberg, Marcel Dekker.
103. Singh, R., Cunningham, A., Mofidi, S., Douglas, T., Frazier, D., Hook, D., . . . Rohr, F. (2016). Updated, web-based nutrition management guideline for PKU: An evidence and consensus based approach. *Molecular Genetics and Metabolism*, 118(2).
104. Sogabe, T., Kobayashi, R., Thanatuksorn, P., Suzuki, T., & Kawai, K. (2021). Physical and structural characteristics of starch-based and conventional

cookies: Water sorption, mechanical glass transition, and texture properties of their crust and crumb. *Journal of Texture Studies*, 52(3).

105. Soltanizadeh, N., & Mirmoghtadaie, L. (2014). Strategies Used in Production of Phenylalanine-Free Foods for PKU Management. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(3).

106. Steffe, J. (1996). *Rheological methods in food engineering process*.

107. Stępień, A., Witczak, M., & Witczak, T. (2020). Sorption properties, glass transition and state diagrams for pumpkin powders containing maltodextrins. *LWT*, 134.

108. Stieger, M. (2019). The Rheology Handbook - For users of rotational and oscillatory rheometers. *Applied Rheology*, 12(5).

109. Tebben, L., Chen, G., Tilley, M., & Li, Y. (2022). Improvement of whole wheat dough and bread properties by emulsifiers. *Grain & Oil Science and Technology*, 59-69.

110. Thomas, J., Levy, H., Amato, S., Vockley, J., Zori, R., Dimmock, D., . . . Northrup, H. (2018). Pegvaliase for the treatment of phenylketonuria: Results of a long-term phase 3 clinical trial program (PRISM). *Molecular Genetics and Metabolism*, 124(1).

111. Van Bockstaele, F., De Leyn, I., Eeckhout, M., & Dewettinck, K. (2011). Non-linear creep-recovery measurements as a tool for evaluating the viscoelastic properties of wheat flour dough. *Journal of Food Engineering*, 107(1).

112. Van Calcar, S., MacLeod, E., & Gleason, S. (2010). Improved nutritional management of phenylketonuria by using a diet containing glycomacropeptide compared with amino acids (The American Journal of Clinical Nutrition (2009), 89 (1068-1077)). *American Journal of Clinical Nutrition*, 91(4).

113. Van Spronsen, F. J.-Q. (2017). Key European guidelines for the diagnosis and management of patients with phenylketonuria. *The Lancet Diabetes & Endocrinology*, 743-756.

114. Van Vliet, D., Bruinenberg, V., Mazzola, P., Van Faassen, M., De Blaauw, P., Kema, I., . . . Van Spronsen, F. (2015). Large neutral amino acid supplementation exerts its effect through three synergistic mechanisms: Proof of principle in phenylketonuria mice. *PLoS ONE*, *10*(12).
115. Van Wegberg, A., MacDonald, A., Ahring, K., Bélanger-Quintana, A., Blau, N., Bosch, A., . . . Van Spronsen, F. (2017). The complete European guidelines on phenylketonuria: Diagnosis and treatment. *Orphanet Journal of Rare Diseases*, *12*(1).
116. *Vitaflo UK | Innovation in Nutrition*. (n.d.). Retrieved from <https://www.nestlehealthscience.co.uk/vitaflo>
117. Vockley, J., Andersson, H., Antshel, K., Braverman, N., Burton, B., Frazier, D., . . . Berry, S. (2014). Phenylalanine hydroxylase deficiency: Diagnosis and management guideline. *Genetics in Medicine*, *16*(2).
118. Wahlsten, D. (2019, 1). *Phenylketonuria (PKU)*. Academic Press.
119. Weglage, J., Fromm, J., van Teeffelen-Heithoff, A., Möller, H., Koletzko, B., Marquardt, T., . . . Feldmann, R. (2013). Neurocognitive functioning in adults with phenylketonuria: Results of a long term study. *Molecular Genetics and Metabolism*, *110*(SUPPL.).
120. Williams, P. (2006). An overview of the structure - Function relationships of hydrocolloids. *Gums and Stabilisers for the Food Industry* *13*.
121. Witczak, M., Korus, J., Ziobro, R., & Juszczak, L. (2019, 1). Waxy starch as dough component and anti-staling agent in gluten-free bread. *LWT*, *99*, 476-482.
122. Wu, J. (2014). Eggs and Egg Products Processing. In *Food Processing: Principles and Applications: Second Edition* (Vol. 9780470671146).
123. Xiong, H., Xie, X., Li, Y., & Li, L. (2023). Stabilization mechanism of different emulsifiers using dissipative particle dynamic simulation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 131797.

124. Xu, F., Liu, W., Zhang, L., Liu, Q., Wang, F., Zhang, H., . . . Blecker, C. (2022, 12). Thermal, structural, rheological and morphological properties of potato starch-gluten model dough systems: Effect of degree of starch pre-gelatinization. *Food Chemistry*, 396, 133628.
125. Xu, J., Zhang, Y., Wang, W., & Li, Y. (2020). Advanced properties of gluten-free cookies, cakes, and crackers: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 103.
126. Yang, S., & Baldwin, R. (2017). Functional properties of eggs in foods. In *Egg Science and Technology, Fourth Edition*.
127. Yazici, G., & Ozer, M. (2021). A review of egg replacement in cake production: Effects on batter and cake properties. *Trends in Food Science and Technology*, 111.
128. *Yes We Cook That - Glasgow's ultimate food and wine delivery service*. (n.d.). Retrieved from <http://www.yeswecookthat.com/>
129. Zannini, E., Jones, J., Renzetti, S., & Arendt, E. (2012). Functional replacements for gluten. *Annual Review of Food Science and Technology*, 3(1).
130. Zannini, E., Kingston, W., Arendt, E., & Waters, D. (2013). Technological challenges and strategies for developing low-protein/protein-free cereal foods for specific dietary management. *Food Research International*, 54(1).
131. Zhang, X., Wang, Z., Wang, L., Ou, X., Huang, J., & Luan, G. (2023, 8). Structural support of zein network to rice flour gluten-free dough: Rheological, textural and thermal properties. *Food Hydrocolloids*, 141, 108721.
132. Zhang, Z., Fan, X., Ma, H., Li, C., Li, E., & Gilbert, R. (2021, 3). Characterization of the baking-induced changes in starch molecular and crystalline structures in sugar-snap cookies. *Carbohydrate Polymers*, 256, 117518.
133. Zhu, X., Tao, H., Wang, H., & Xu, X. (2023, 1). Impact of water soluble arabinoxylan on starch-gluten interactions in dough. *LWT*, 173, 114289.

134. Žilić, S., Kocadağlı, T., Vančetović, J., & Gökmen, V. (2016). Effects of baking conditions and dough formulations on phenolic compound stability, antioxidant capacity and color of cookies made from anthocyanin-rich corn flour. *LWT*, 65.

135. Бабіч, О.В. (2006) *Розроблення технології “безглютенового” печива для хворих на целиакию*. (Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук). Національний університет харчових технологій. Київ

136. Богатирьова, Є.В., Дорохович, В.В., Грицевіч, М.Ю. (2020) Розроблення низькобілкового печива з застосуванням кукурудзяного крохмалю та структуроутворювачів. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Матеріали 86 Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів*. 2-3 квітня 2020 р., Київ, НУХТ, С. 120.

137. Дорохович, А., Бабич, О., В., Т., & Лазоренко, М. (2005). Дослідження кінетики прогріву тістових заготовок здобного безглютенового печива [Investigation of the kinetics of heating of dough pieces of gluten-free butter cookies]. *Journal of Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture*, 190-196.

138. Дорохович, А., Дорохович, В., Абрамова, А., & Петренко, М. (2022). *Технологія печива звичайного і спеціального призначення. Навчальний посібник. [Technology of cookies for general and special purposes. Study guide.]*. Київ: Inkos.

139. Дорохович, А.М., & Ковбаса, В.М. (2015) *Технологія та лабораторний практикум кондитерських виробів і харчових концентратів: лабораторний практикум*. Київ: Інкос.

140. Дорохович, А., & Петренко, М. (2016). Розробка технологій затяжного печива спеціального з урахуванням вимог нутріціології для людей

похилого віку [Development of technologies for special long-lasting cookies taking into account the requirements of nutrition for the elderly].

141. Дорохович, А., & Петренко, М. (2017). Вплив зшитого крохмалю, інуліну та білкових ізолятів на процес термооброблення зтяжного печива спеціального призначення [Influence of cross-linked starch, inulin and protein isolates on the process of heat treatment of long-lasting special-purpose biscu]. *Scientific works of NUFT*, 23(6), 192-198.

142. Дорохович, В.В. (2010) *Наукове обґрунтування і розроблення технологій борошняних кондитерських виробів спеціального дієтичного споживання*. (Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук). Національний університет харчових технологій. Київ

143. Дорохович, В.В., Богатирьова, Є.В., Грицевіч, М.Ю. (2019) Особливості розроблення низькобілкових «борошняних» кондитерських виробів. *Perspectives of world science and education. Abstracts of the 2nd International scientific and practical conference*. 30-31 of October 2019, Osaka, Japan. 2019. Pp. 482-487.

144. Дорохович, В.В., Грицевіч, М.Ю. (2018) Інноваційна технологія низькобілкового печива для хворих на фенілкетонурію. «Здобутки та перспективи розвитку кондитерської галузі»: Міжнародна науково-практична конференція. 13 вересня 2018 р., Київ, НУХТ, С. 94-96.

145. Дорохович, В.В., Грицевіч, М.Ю. (2020) Технологічні виклики при розробці низькобілкових «борошняних» кондитерських виробів для хворих на фенілкетонурію. Технології харчових продуктів і комбікормів: Збірник тех доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, 22.25 вересня 2020 р., Одеса, Україна: ОНАХТ, С. 37.

146. Дорохович, В.В., Грицевіч, М.Ю. (2020) Дослідження впливу кукурудзяного та тапіокового крохмалю на органолептичні показники низькобілкового печива. *Здобутки та перспективи розвитку кондитерської*

галузі: Міжнародна науково-практична конференція. 24 листопада 2020 р., Київ, НУХТ, С. 106-107.

147. Дорохович, В.В., Грицевіч, М.Ю., Богатирьова, Є.В., & Антонік, А.В. (2019). Низькобілкове печиво: розробки та перспективи. *Хлібний і кондитерський бізнес*, 4, 26-27.

148. Дорохович, В.В., Грицевіч, М.Ю., Богатирьова, Є.В. (2019) Перспективи розроблення безбілкового печива. «Здобутки та перспективи розвитку кондитерської галузі»: Міжнародна науково-практична конференція. 10-11 вересня 2019 р., Київ, НУХТ, С. 96-98.

149. Дорохович, В.В., Грицевіч, М.Ю., Богатирьова, Є.В. (2019) Розроблення низькобілкових «борошняних» кондитерських виробів – актуальне завдання. *Інноваційний розвиток харчової індустрії: VII Міжнародна науково практична конференція*. 21 листопада 2019 р., Інститут продовольчих ресурсів НААН. С. 37-38.

150. Дорохович, В.В., Грицевіч, М.Ю., Лоза І.П. (2019) Проблематика розроблення низькобілкових «борошняних» кондитерських виробів для хворих на фенілкетонурію *Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті євроінтеграції: VIII Міжнародна науково-практична конференція*. 5-6 листопада 2019 р. Київ, НУХТ, С. 144=145

151. Дзигар, О.О. (2021) *Удосконалення технології крекерів з додаванням поліпшувача протеолітичної дії, амарантового борошна та пряно-ароматичної сировини*. (Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії). Національний університет харчових технологій. Київ

152. Грабовська, О.В. (2019) *Технології крохмалю і крохмалепродуктів: підручник*. Київ: НУХТ

153. Грицевіч, М.Ю., Богатирьова, Є.В., Антонік, А.В., Дорохович, В.В. (2019) Вплив структуроутворювачів камеді гуару та карбоксиметилцеллюлози на кількість вільної і зв'язаної вологи в тістових

масах для низькобілкового печива. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: Матеріали 85 Ювілейної Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів*. 11-12 квітня 2019 р., Київ, НУХТ, С. 204.

154. Грицевіч, М.Ю., Дорохович, В.В. (2023). Дослідження впливу крохмальної сировини на сорбційно-десорбційні властивості низькобілкового печива. *Харчова промисловість*, 33(1), 26-27.

155. Грицевіч, М., & Дорохович, В. (2023). Дослідження реологічних властивостей та мікроструктури емульсій для приготування низькобілкового тіста. *Věda a perspektivy*, 9(28), 386–397. [https://doi.org/10.52058/2695-1592-2023-9\(28\)-386-397](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2023-9(28)-386-397)

156. Грицевіч, М., & Дорохович, В. (2023). Розробка рецептур низькобілкового печива для хворих на фенілкетонурію. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 2(5), 31–39. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230205.04>

157. Грицевіч, М.Ю., Дорохович, В.В. (2023) Особливості технології низькобілкового печива. *інноваційні технології розвитку харчових виробництв та ресторанної індустрії: наукові пошуки молоді: Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених*. 26 жовтня 2023 р., Харків, ДБТУ, С. 16.

158. Грицевіч, М.Ю., Дорохович, В.В., Думплер, Й. (2023) Вплив камеді ксантану на процес термооброблення низькобілкового печива. Проблеми і практичні підходи виробництва та регулювання використання харчових добавок в країнах Європейського Союзу та в Україні: Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції. 24-24 жовтня 2023 р., Київ: НУХТ, С. 14.

159. Грищенко, А. М., & Дробот, В. І. (2014). Технологічні властивості безглютенкових видів сировини. *Наукові праці ОНАХТ*, 1(46), 162-166

160. Іваненко, І.М. (2017) Теоретичні основи, технологія і обладнання адсорбційних процесів: Розділ 1. Промислові адсорбенти, їх властивості і застосування. *Методичні вказівки до практичних занять для студентів спеціальності 161 Хімічні технології та інженерія*. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 37

161. Оболкіна, В.И., Алексеєнко Н.В. (2019). Как продлить срок годности мучных кондитерских изделий. Мир Продуктов. 4, 26.28

162. *Печиво. Загальні технічні умови* (2014) ДСТУ 3781:2014 від 01 липня 2015. Київ: Держстандарт України

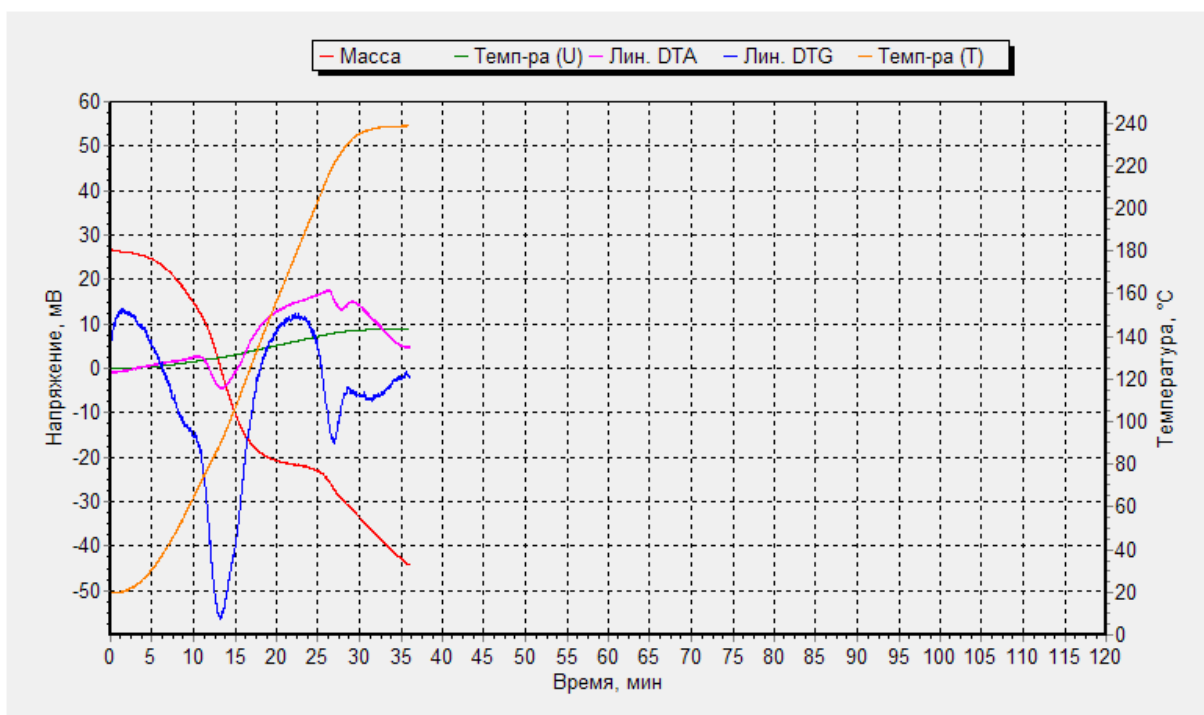
163. *Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів, Закон України № 771/97-ВР (2023) (Україна)*. (n.d.). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771/97-вр#Text>  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771/97-вр#Text>

164. Юрчак, В.Г., & Махинько, В.М. (2021) *Оптимізація та статистичні методи аналізу в харчових технологіях. Модуль 1. Оптимізація технологічних процесів виробництва борошняних, кондитерських виробів та харчоконцентратів: лабораторний практикум для здобувачів освітнього ступеня "Магістр" спец. 181 "Харчові технології" освітньо-професійної програми "Технології хліба, кондитерських, макаронних виробів та харчоконцентратів" денної та заочної форми навчання*. Київ: НУХТ.

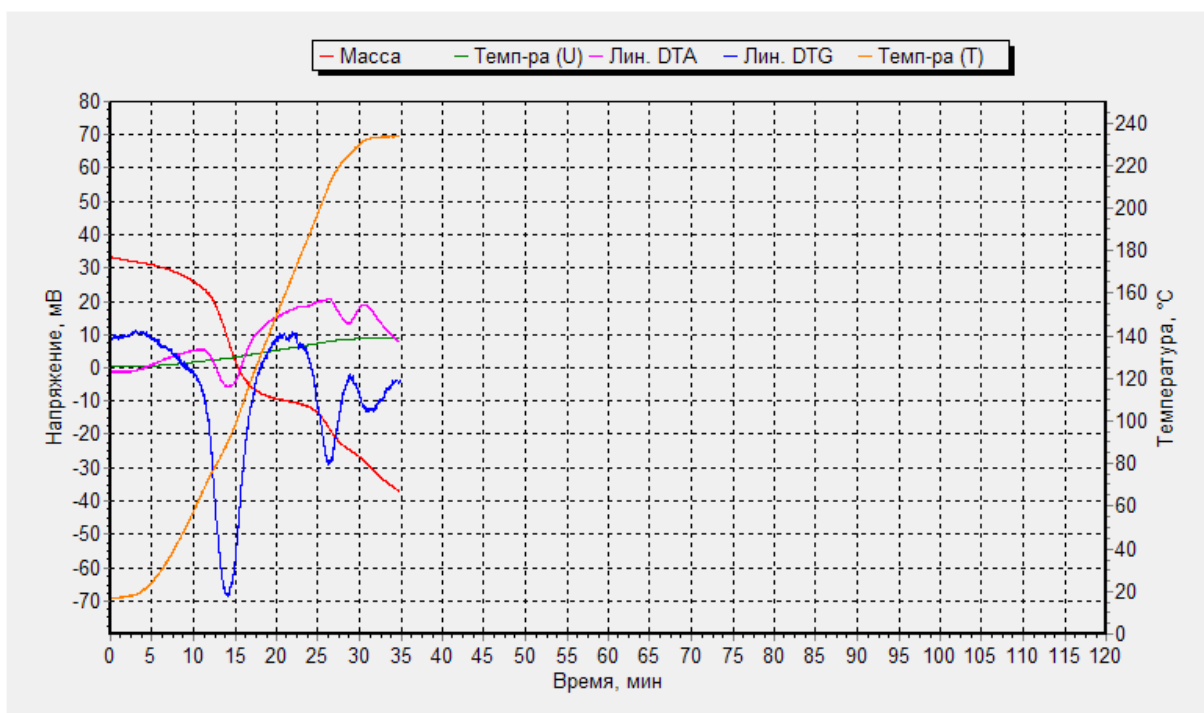
## **ДОДАТКИ**

**ДОДАТОК А**

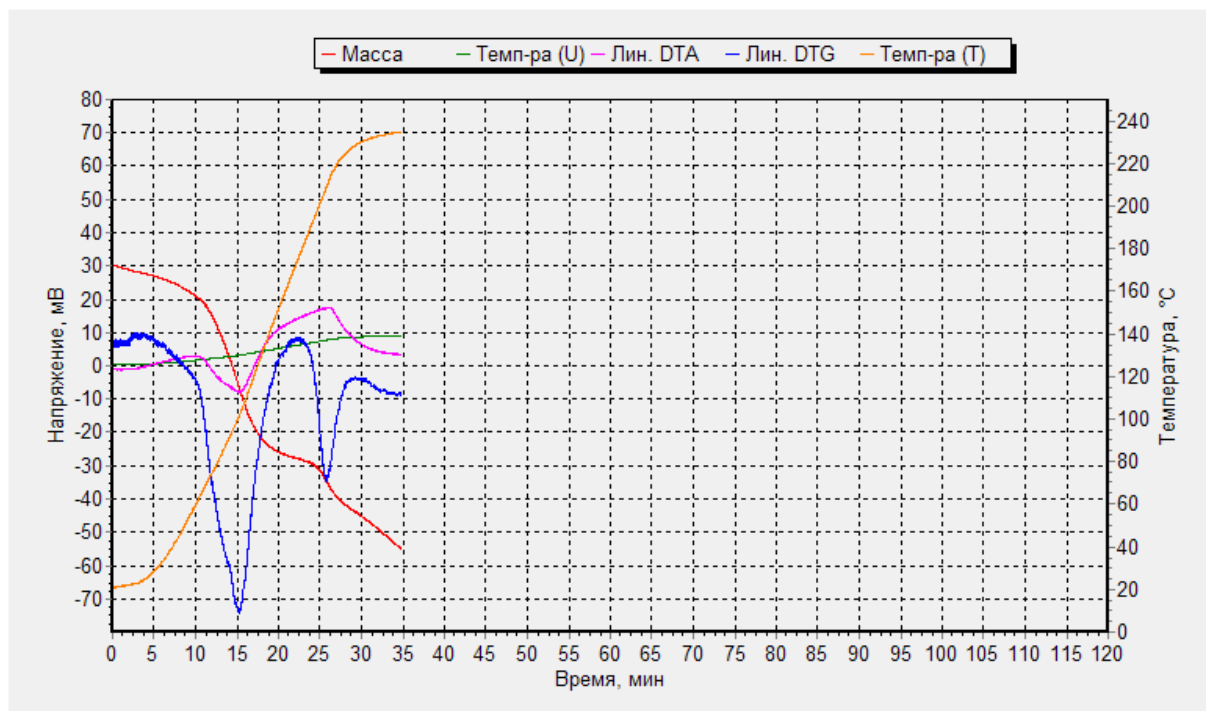
**ГРАФІКИ ДЕРИВАТОГРАФІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ  
НИЗЬКОБІЛКОВОГО ТІСТА ТА ТІСТА ДЛЯ ТРАДИЦІЙНОГО  
ЗДОБНОГО ПЕЧИВА**



**Рис. А1 – Дериватограма низькобілкового тіста виготовленого на основі кукурудзяного крохмалю та камеді ксантану**



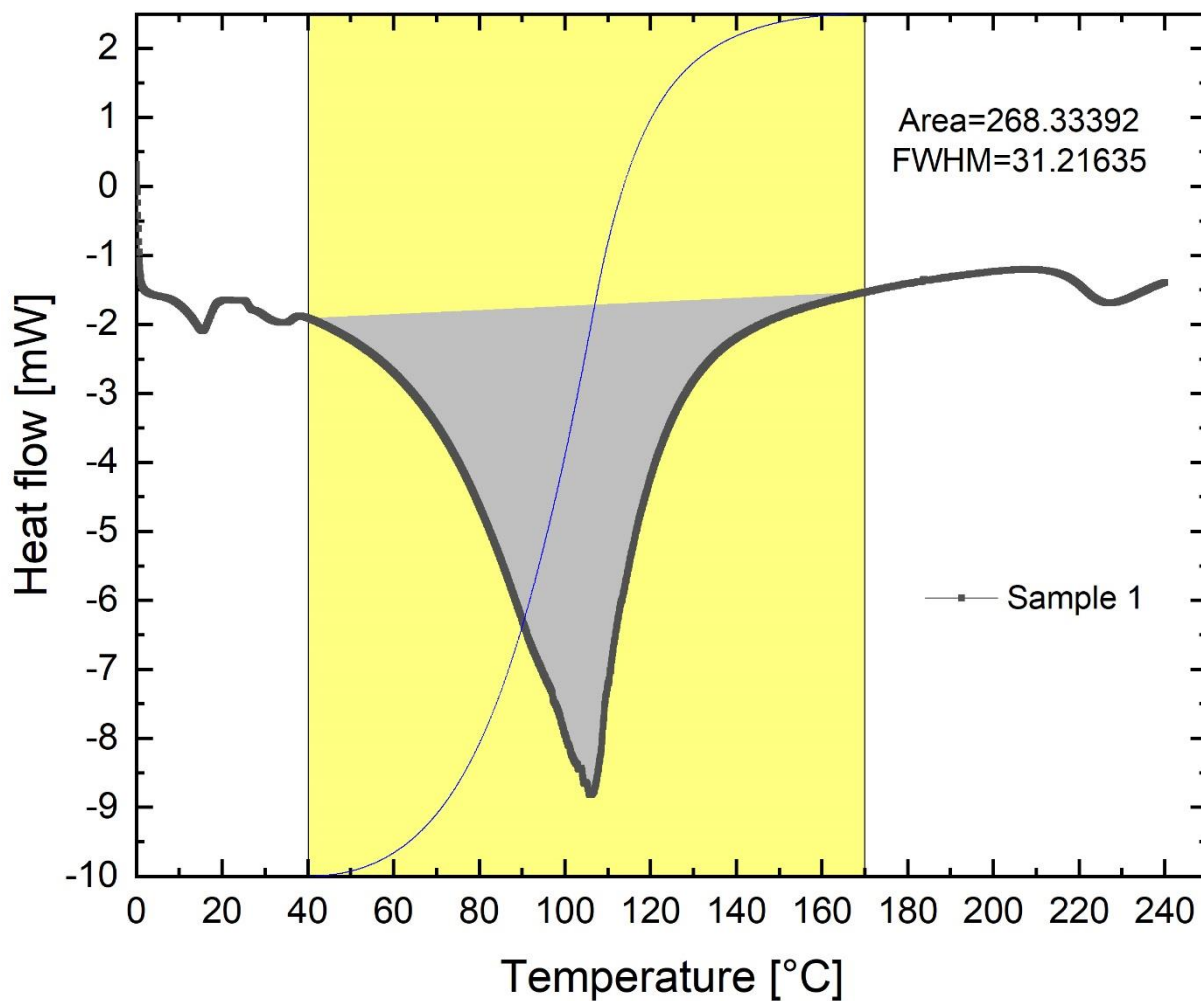
**Рис. А2 – Дериватограма низькобілкового тіста виготовленого на основі кукурудзяного крохмалю, мальтожекстрину та камеді ксантану**



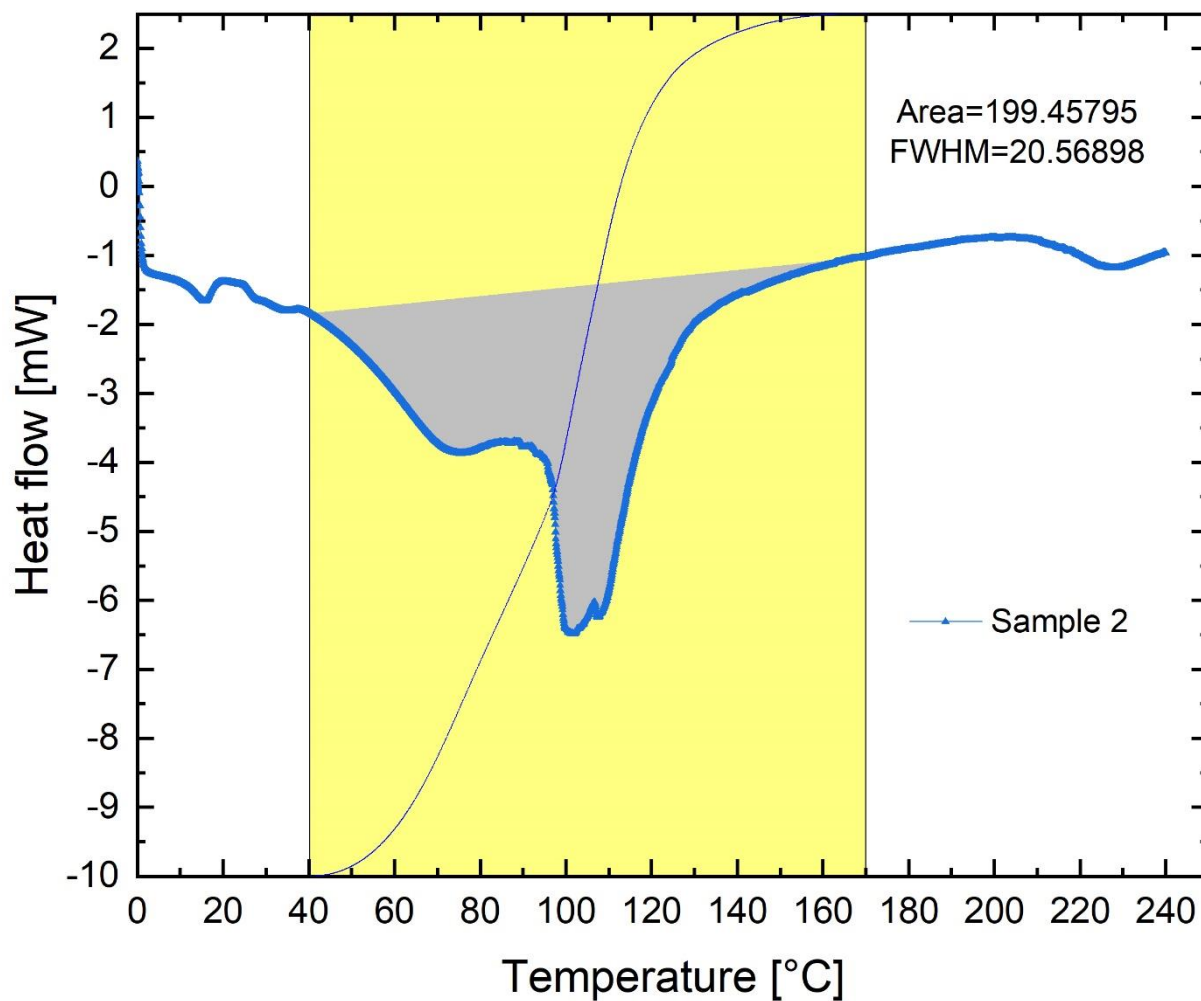
**Рис. А3 – Дериватограма тіста для приготування традиційного здобного печива виготовленого на основі пшеничного борошна**

**ДОДАТОК Б**

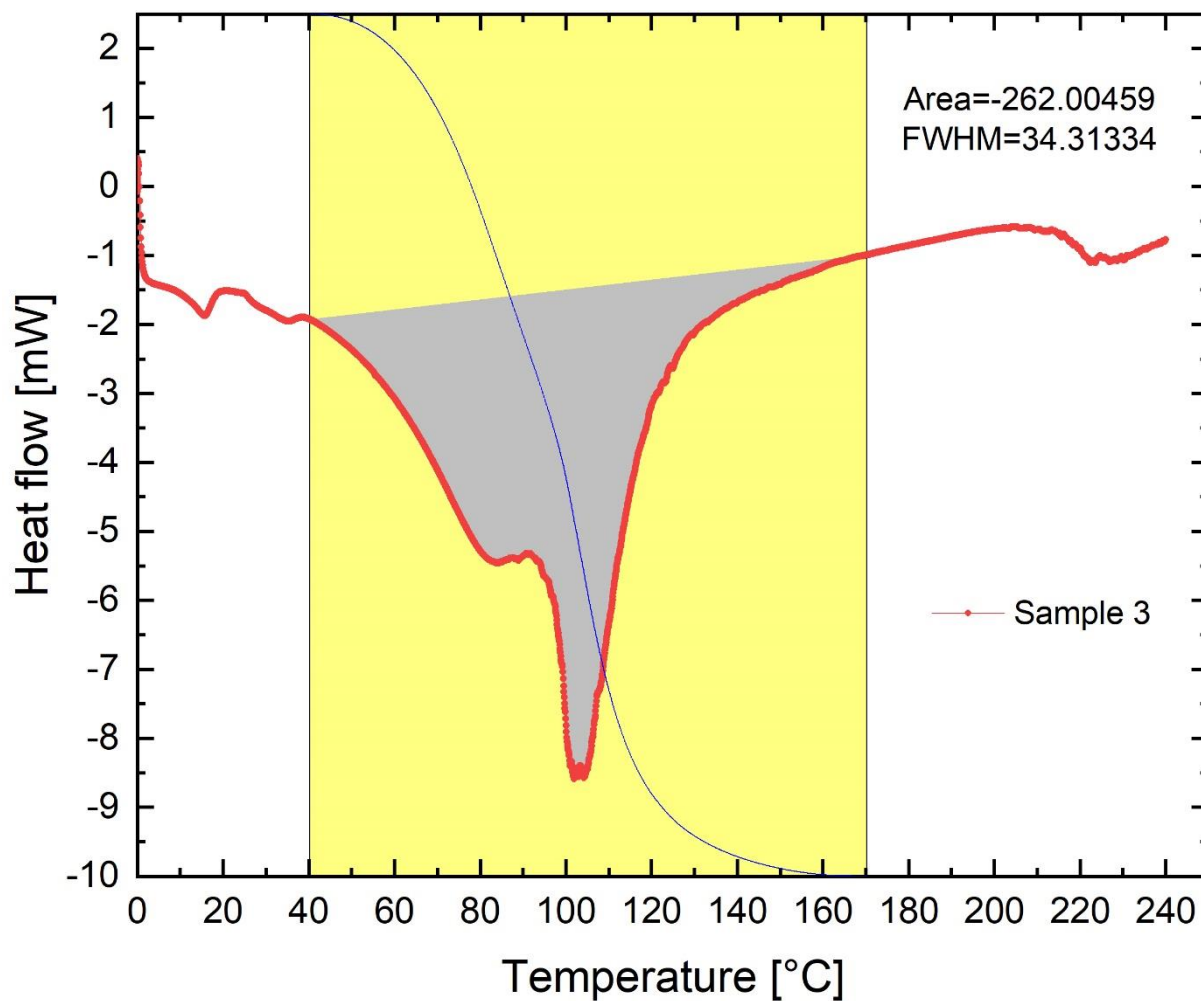
**ГРАФІКИ РОЗРАХУНКУ ЕНТАЛЬПІЇ ПРОЦЕСУ  
ТЕРМООБРОБЛЕННЯ НИЗЬКОБІЛКОВОГО ТІСТА ТА ТІСТА ДЛЯ  
ТРАДИЦІЙНОГО ЗДОБНОГО ПЕЧИВА**



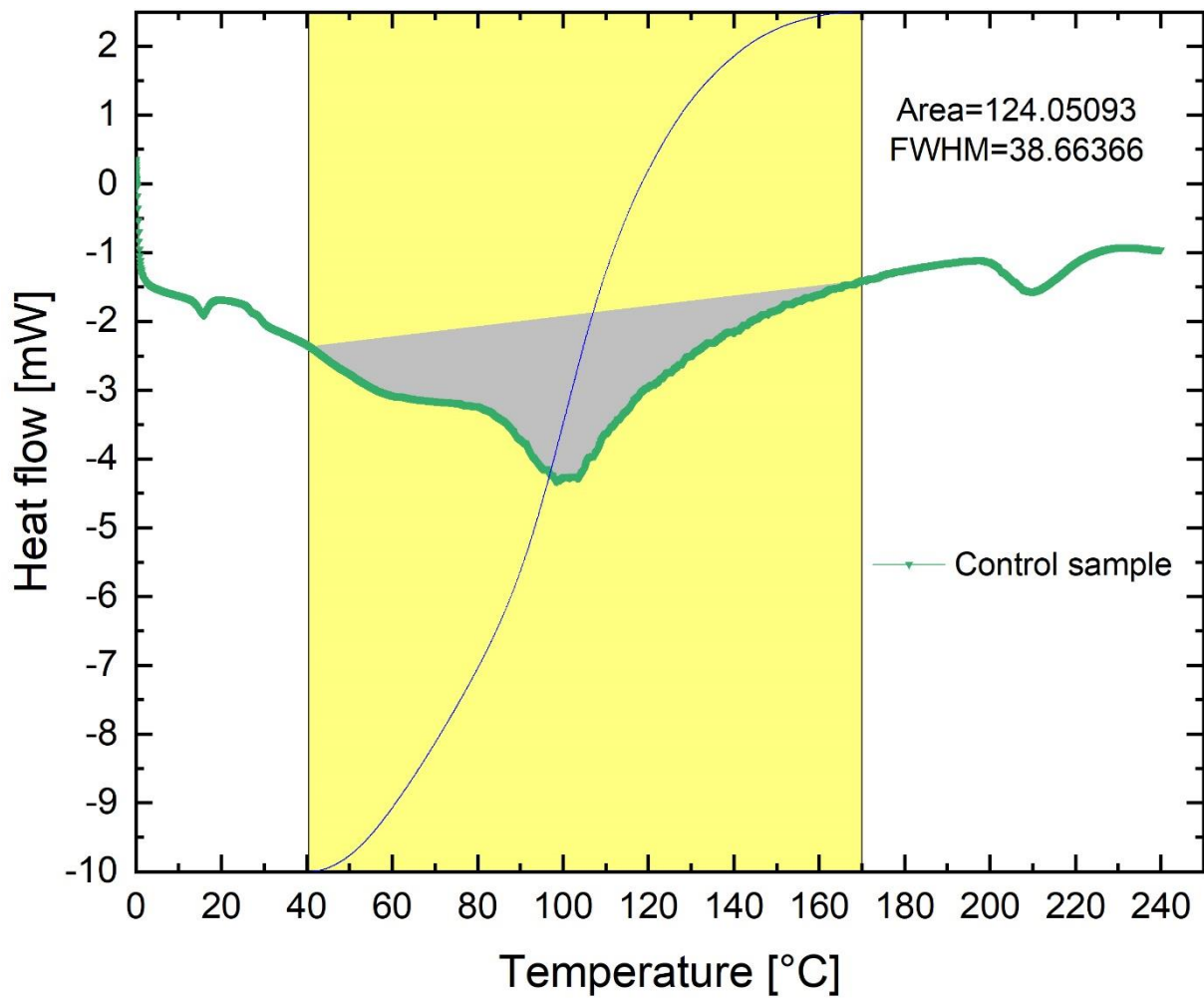
**Рис. Б1 – Розрахунок ентальпії процесу термооброблення  
низькобілкового тіста виготовленого на основі кукурудзяного  
крохмалю, мальтодекстрину та камеді ксантану**



**Рис. Б1 – Розрахунок ентальпії процесу термооброблення низькобілкового тіста виготовленого на основі кукурудзяного і тапіокового крохмалів, мальтодекстрину та камеді ксантану**



**Рис. Б1 – Розрахунок ентальпії процесу термооброблення  
низькобілкового тіста виготовленого на основі кукурудзяного  
крохмалю та камеді ксантану**



**Рис. Б4 – Розрахунок ентальпії процесу термооброблення тіста для приготування традиційного здобного печива виготовленого на основі пшеничного борошна**

**ДОДАТОК В**

**ОРГАНОЛЕПТИЧНІ ПОКАЗНИКИ РОЗРОБЛЕНОГО**

**НИЗЬКОБІЛКОВОГО ПЕЧИВА**

**Таблиця В.1 – Органолептичні властивості низькобілкового печива розробленого у першому блоці досліджень.**

| Органолептичні показники | Вироби виготослені за рецептурами                                    |  |   |  |  |
|--------------------------|--|--|---|--|--|
|                          | 1.1  | 1.2  | 1.3   | 1.4  | 1.5  |
| Форма                    | Тістові заготовки втратили свою початкову форму, розплилися          | Тістові заготовки не суттєво втратили свою початкову форму                 | Форма правильна, відповідна до форми тістової заготовки | Форма правильна, відповідна до форми тістової заготовки        | Форма правильна, відповідна до форми тістової заготовки        |
| Стан поверхні            | Вкрита тріщинами   | Вкрита тріщинами   | Гладенька, без тріщин                                   | Гладенька, без тріщин, з темними вкрапленнями                  | Гладенька, без тріщин  |
| Колір                    | Світло-жовтий  | Світло-жовтий  | Світло-жовтий   | Світло-жовтий  | Світло-жовтий  |
| Смак та запах            | Запах притаманний даній групі виробів, крохмаль відчувається на смак | Запах притаманний даній групі виробів, крохмаль менше відчувається на смак | Запах притаманний даній групі виробів, смак приємний    | Запах притаманний даній групі виробів, камедь відчутна на смак | Запах притаманний даній групі виробів, камедь відчутна на смак |
| Вигляд у розломі         | Всередині пористі, тверде  | Рівномірна пористість  | Рівномірна пористість                                   | Рівномірна пористість  | Рівномірна пористість  |

**Таблиця В.2 – Органолептичні властивості низькобілкового печива розробленого у другому блоці досліджень.**

| Органолептичні показники | Вироби виготослені за рецептурами   |  |  |  |
|--------------------------|---|--|--|--|
|                          | 2.1   | 2.2  | 2.3  | 2.4  |
| Форма                    | Правильна, краї рівні   | Правильна, краї рівні  | Правильна, краї рівні                                      | Правильна, краї рівні  |
| Стан поверхні            | Не підгоріла, є невелика кількість тріщин                                     | Не підгоріла, поверхня має дуже багато тріщин                        | Не підгоріла, поверхня має дуже багато тріщин              | Не підгоріла, рівномірно гладка                                      |
| Колір                    | Білий з жовтуватим відтінком, рівномірний                                     | Білий з світло-жовтуватим відтінком, рівномірний                     | Білий з світло-жовтуватим відтінком, рівномірний           | Білий з світло-жовтуватим відтінком, рівномірний                     |
| Смак та запах            | Запах притаманний даній групі виробів, крохмаль майже не відчувається на смак | Запах притаманний даній групі виробів, крохмаль відчувається на смак | Запах притаманний даній групі виробів, смак приємний       | Запах притаманний даній групі виробів, крохмаль відчувається на смак |
| Вигляд у розломі         | Пропечене, рівномірна пористість, без порожнин, є сліди непромісу             | Пропечене з нерівномірною пористістю, є сліди непромісу              | Пропечене з нерівномірною пористістю, без слідів непромісу | Пропечене з рівномірною пористістю, без пустот і слідів непромісу    |

**Таблиця В.3 – Органолептичні властивості низькобілкового печива розробленого у третьому блоці досліджень.**

| Органолептичні показники | Вироби виготовлені за рецептурами   |  |  |
|--------------------------|---|--|--|
|                          | 3.1   | 3.2  | 3.3  |
| Форма                    | Правильна, краї рівні   | Правильна, краї рівні  | Розпливчаста, вироби втратили форму тістових заготовок під час випікання |
| Стан поверхні            | Не підгоріла, є невелика кількість тріщин                                     | Не підгоріла, гладенька  | Не підгоріла, гладенька  |
| Колір                    | Білий з жовтуватим відтінком, рівномірний                                     | Білий з жовтуватим відтінком, рівномірний                                  | Білий з жовтуватим відтінком, рівномірний                                |
| Смак та запах            | Запах притаманний даній групі виробів, крохмаль майже не відчувається на смак | Запах притаманний даній групі виробів, приємний смак без присмаку крохмалю | Запах притаманний даній групі виробів, смак приємний                     |
| Вигляд у розломі         | Пропечене, рівномірне пористість, без порожнин, без слідів непромісу          | Пропечене, рівномірне пористість, без порожнин, без слідів непромісу       | Пропечене з нерівномірною пористістю, без слідів непромісу               |

**Таблиця В.4 – Органолептичні властивості низькобілкового печива розробленого у четвертому блоці досліджень.**

| Органолептичні показники | Вироби виготослені за рецептурами                                    |  |   |  |  |
|--------------------------|--|--|---|--|--|
|                          | 1.1  | 1.2  | 1.3   | 1.4  | 1.5  |
| Форма                    | Форма правильна, відповідна до форми тістової заготовки              | Форма правильна, відповідна до форми тістової заготовки                    | Форма правильна, відповідна до форми тістової заготовки | Форма правильна, відповідна до форми тістової заготовки        | Форма правильна, відповідна до форми тістової заготовки        |
| Стан поверхні            | Гладенька, без тріщин  | Гладенька, без тріщин  | Гладенька, без тріщин                                   | Гладенька, без тріщин  | Гладенька, без тріщин  |
| Колір                    | Шоколадний   | Світло-жовтий  | Жовтий  | Блідо-жовтий   | Блідо-жовтий   |
| Смак та запах            | Запах притаманний даній групі виробів, крохмаль відчувається на смак | Запах притаманний даній групі виробів, крохмаль менше відчувається на смак | Запах притаманний даній групі виробів, смак приємний    | Запах притаманний даній групі виробів, камедь відчутна на смак | Запах притаманний даній групі виробів, камедь відчутна на смак |
| Вигляд у розломі         | Рівномірна пористість  | Рівномірна пористість  | Рівномірна пористість                                   | Рівномірна пористість  | Рівномірна пористість  |

**ДОДАТОК Г**  
**ЗАТВЕРДЖЕНІ РЕЦЕПТУРИ РОЗРОБЛЕНОГО**  
**НИЗЬКОБІЛКОВОГО ПЕЧИВА**

ПОГОДЖЕНО:

Голова СГДК



О.В. Балдинюк

«12» грудня 2019 р.

## РЕЦЕПТУРА

---

### ПЕЧИВО НИЗЬКОБІЛКОВЕ ЗДОБНЕ «Ванільна фантазія»

ДСТУ 3781

РЦ 18 Україна 36858620-138-К-2019

---

Рекомендована до затвердження Спеціалізованою галузевою дегустаційною комісією з оцінки якості кондитерських виробів, харчових концентратів, кави, чаю та напоїв на їх основі Асоціації «УКРКОНДПРОМ».

Протокол № 14 від «12» грудня 2019 р.

Термін введення з «12» грудня 2019 р.

Виробляється відповідно до Технологічної інструкції «Технологічна інструкція по виробництву низькобілкового печива «Ванільна фантазія» (ТІ 18 Україна 36858620-9-2019)

Розроблено **Національним університетом харчових технологій**

ПОГОДЖЕНО:

Голова СГДК



О.В. Балдинюк

«12» грудня 2019 р.

## РЕЦЕПТУРА

---

### ПЕЧИВО НИЗЬКОБІЛКОВЕ ЗДОБНЕ «Шоколадна фантазія»

ДСТУ 3781

РЦ 18 Україна 36858620- *137* -К-2019

---

Рекомендована до затвердження Спеціалізованою галузевою дегустаційною комісією з оцінки якості кондитерських виробів, харчових концентратів, кави, чаю та напоїв на їх основі Асоціації «УКРКОНДПРОМ».

Протокол № *7* від «12» грудня 2019 р.

Термін введення з «12» грудня 2019 р.

Виробляється відповідно до Технологічної інструкції «Технологічна інструкція по виробництву низькобілкового печива «Шоколадна фантазія»» (ТІ 18 Україна 36858620- *8* -2019)

Розроблено **Національним університетом харчових технологій**

ПОГОДЖЕНО:

Голова СГДК



О.В. Балдинюк

«12» грудня 2019 р.

## РЕЦЕПТУРА

---

### ПЕЧИВО НИЗЬКОБІЛКОВЕ ЗДОБНЕ «Ванільна мрія»

ДСТУ 3781

РЦ 18 Україна 36858620- *136* -К-2019

---

Рекомендована до затвердження Спеціалізованою галузевою дегустаційною комісією з оцінки якості кондитерських виробів, харчових концентратів, кави, чаю та напоїв на їх основі Асоціації «УКРКОНДПРОМ».

Протокол № *7* від «12» грудня 2019 р.

Термін введення з «12» грудня 2019 р.

Виробляється відповідно до Технологічної інструкції «Технологічна інструкція по виробництву низькобілкового печива «Ванільна мрія» (ТІ 18 Україна 36858620- *136* -2019)

Розроблено **Національним університетом харчових технологій**

**ДОДАТОК Д**

**ЗАТВЕРДЖЕНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ІНСТРУКЦІЇ РОЗРОБЛЕНОГО**

**НИЗЬКОБІЛКОВОГО ПЕЧИВА**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**  
Ректор НУХТ

\_\_\_\_\_ А.І.Українець

«    » \_\_\_\_\_ 2019 р

**ПОГОДЖЕНО**  
Голова СГДК

\_\_\_\_\_ О.В. Балдинюк

«12» грудня 2019 р.



**ТЕХНОЛОГІЧНА ІНСТРУКЦІЯ**  
**З виробництва**  
**низькобілкового здобного печива «Ванільна фантазія»**

ТІ 18 Україна 36858620- *9* -2019

Рекомендована до затвердження Спеціалізованою галузевою дегустаційною комісією з оцінки якості кондитерських виробів, харчових концентратів, кави, чаю та напоїв на їх основі Асоціації «УКРКОНДПРОМ».

Протокол № *7* від «12» грудня 2019 р.

Термін введення з «12» грудня 2019 р.

Розроблена спеціалістами Національного університету харчових технологій. Ця технологічна інструкція не може бути використана іншими підприємствами без дозволу розробника.

Розроблено **Національним університетом харчових технологій**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

**Ректор НУХТ**

\_\_\_\_\_ **А.І.Українець**

«  » \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ПОГОДЖЕНО:**

**Голова СГДК**



\_\_\_\_\_ **О.В. Балдинюк**

«12» грудня \_\_\_\_\_ 2019 р.

## ТЕХНОЛОГІЧНА ІНСТРУКЦІЯ

З виробництва  
низькобілкового здобного печива «Ванільна мрія»

ТІ 18 Україна 36858620- 7 -2019

Рекомендована до затвердження Спеціалізованою галузевою дегустаційною комісією з оцінки якості кондитерських виробів, харчових концентратів, кави, чаю та напоїв на їх основі Асоціації «УКРКОНДПРОМ».

Протокол № 7 від «12» грудня 2019 р.

Термін введення з «12» грудня 2019 р.

Розроблена спеціалістами Національного університету харчових технологій. Ця технологічна інструкція не може бути використана іншими підприємствами без дозволу розробника.

Розроблено **Національним університетом харчових технологій**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**  
**Ректор НУХТ**

\_\_\_\_\_ А.І.Українець

«    » \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ПОГОДЖЕНО:**

**Голова СГДК**



\_\_\_\_\_ О.В. Балдинюк

«12» \_\_\_\_\_ грудня 2019 р.

## ТЕХНОЛОГІЧНА ІНСТРУКЦІЯ

З виробництва  
низькобілкового здобного печива «Шоколадна фантазія»

ТІ 18 Україна 36858620- 8 -2019

Рекомендована до затвердження Спеціалізованою галузевою дегустаційною комісією з оцінки якості кондитерських виробів, харчових концентратів, кави, чаю та напоїв на їх основі Асоціації «УКРКОНДПРОМ».

Протокол № 8 від «12» грудня 2019 р.

Термін введення з «12» грудня 2019 р.

Розроблена спеціалістами Національного університету харчових технологій. Ця технологічна інструкція не може бути використана іншими підприємствами без дозволу розробника.

Розроблено **Національним університетом харчових технологій**