

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЦИХАНОВСЬКА ІРИНА ВАСИЛІВНА

УДК 001.891:577.1-022.532 (043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

**НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ
ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ ІЗ ПОЛІФАЗНОЮ СТРУКТУРОЮ
З ВИКОРИСТАННЯМ НАНОЧАСТИНОК ОКСИДІВ ЗАЛІЗА
ТОМ 1**

Спеціальність 05.18.16 – технологія харчової продукції
Технічні науки

Подається на здобуття наукового
ступеня доктора технічних наук

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

 І.В. Цихановська

Науковий консультант:
Євлаш Вікторія Владленівна,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2019



ЗАСВІДЧУЮ ІДЕНТИЧНІСТЬ ЦЬОГО
ПРИМІРНИКА З ІНШИМИ ПРИМІР-
НИКАМИ ДИСЕРТАЦІЇ, ПОДАНОЇ
ДО СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ ВЧЕНОЇ
РАДИ № 64.088.01

 ОНИЩЕНКО В.М.

АНОТАЦІЯ

Цихановська І.В. Наукове обґрунтування технологій харчових продуктів із поліфазною структурою з використанням наночастинок оксидів заліза. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.16 – технологія харчової продукції. – Харківський державний університет харчування та торгівлі Міністерства освіти і науки України, Харків, 2019.

Дисертаційну роботу присвячено обґрунтуванню наукових засад і розробленню практичних рішень щодо використання функціонально-технологічного потенціалу наночастинок мінерального походження в харчовій продукції з поліфазною структурою, що дасть змогу покращити споживні властивості готової продукції. Із цією метою запропоновано концепцію роботи: сформований у ході виробництва функціонально-технологічний потенціал наночастинок мінерального походження, зокрема оксидів заліза, зумовлений фізико-хімічними показниками і колоїдними властивостями, є основою для вдосконалення і розроблення наукоємних харчових нанотехнологій, адаптованих до різних умов виробництва (підприємств харчової галузі, закладів ресторанного господарства і т.п.), покращення показників якості, подовження термінів зберігання харчової продукції та отримання доданої вартості.

Визначено, що технологія хімічної конденсації є ефективною та дозволяє регулювати фізико-хімічні показники наночастинок на основі оксидів заліза. Встановлено раціональні параметри технологічного процесу утворення наночастинок із цільовою задачею щодо розміру 70...80 нм. Такими умовами та параметрами є: використання 10% розчинів солей дво- та тривалентного феруму в лужному середовищі (рН=10...11) за температури $t=(50\pm 5)^\circ\text{C}$ і 1,7...1,8 кратному надлишку солі Fe (II) та 10,0...10,5 кратному надлишку луку $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$; співвідношення $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}=2:1,75$. Відпрацьована

технологія дозволяє отримати наночастинки з розподілом за діаметром, близьким до монодисперсності.

Визначено фізико-хімічні показники харчової добавки «Магнетофуд» (ХДМ), які доводять, що при ξ -потенціалі 34 мВ...44 мВ, діаметрі 70...80 нм, молярній масі 230,8 г/моль, вмісті заліза в масових відсотках не менше 90% та вологи 10% забезпечуються функціонально-технологічні властивості харчової продукції, що є стійкою до зовнішніх чинників зберігання та окиснення.

Установлено закономірності утворення комплексів «наночастинка-високомолекулярна сполука (білок, полісахарид, жир)», які відбуваються через електростатичну взаємодію та координаційний (донорно-акцепторний) зв'язок. Аналізом цих взаємодій за допомогою «клатратних» моделей виявлено потенціал наночастинок (НЧ) для утворення цілого ряду комплексів за типами: «кластер», «клатрат», «кавітат», «комплекс-сендвіч»; ці моделі дозволили спрогнозувати забезпечення таких властивостей наночастинок, як амфіфільність і «кластерофільність», а введення НЧ до складу харчової продукції зі поліфазною структурою – технологічну стійкість гетерогенної структури шляхом Пікеринг або стеричної стабілізації. Визначено величини фізико-хімічних показників наночастинок ХДМ, такі як мінімальна щільність поверхневого заряду ($pH=6,8...7,0$), енергія ван-дер-ваальсової взаємодії (5...30 кДж/моль), енергія водневого зв'язку (20...70 кДж/моль), що забезпечують таку функціонально-технологічну властивість, як стабілізація дисперсій, які містять полярні та неполярні рідини, тобто стійкі емульсії, суспензії, пасти, креми тощо. Виявлено, що утворення стійких дисперсних систем, до складу яких входять органічні сполуки та вода, за іонними та диполь-іонними взаємодіями відбувається завдяки досить високій енергії координаційного зв'язку 50...200 кДж/моль.

Експериментальним шляхом доведено підвищення стійкості таких колоїдних систем, як емульсії, в середньому в 1,2...1,3 раза, що зумовлено виявленою взаємодією наночастинок ХДМ з вуглеводами, білками, оліями,

жирами і вищими жирними кислотами та їх солями, що приводить до просторового структурування.

Доведено, що здатність наночастинок ХДМ до поляризації, електростатичної координації і прояв цих властивостей в системах, які містять білки та полісахариди (вуглеводи), зумовлює водоутримувальну здатність ХДМ, закономірності якої описані фізико-хімічною моделлю «кластерно-петельно-ланцюгового» типу; урахувуючи полярність наночастинок ХДМ та дипольний характер молекул H_2O , запропоновано «кластерно-капілярну» модель, яка призначена для обґрунтування функцій ХДМ у розчинах полісахаридів (вуглеводів); розроблено та доведено модель «двошарової координації» щодо механізму жирозв'язувальної та жирутримувальної здатності ХДМ за рахунок утворення координаційних та ван-дер-ваальсових комплексів; розроблено моделі взаємодії наночастинок ХДМ з полярними та неполярними рідинами і молекулами; експериментально визначений ξ -потенціал – 34...44 мВ, що є теоретичною підставою для ствердження структуроутворюючої та стабілізуючої здатності ХДМ у харчових системах.

Виявлено, що загальною функціонально-технологічною властивістю наночастинок ХДМ є антиоксидантна, крім того, вони впливають на загущуючі та тиксотропні властивості харчових систем у цілому.

Встановлено закономірності, механізми та раціональні масові частки ХДМ, які в разі введення в технологічний процес виробництва харчової продукції попередньо переводяться в полідисперсний стан у вигляді жирових (ЖС) та водних (ВС) суспензій; визначено функціонально-технологічні властивості (ФТВ) харчових продуктів із ХДМ та встановлено кореляцію між цими властивостями та механізмами гідратації, розчинення, утворення молекулярних шарів, кластерів та клатратів, що зумовлені поверхневою активністю наночастинок ХДМ.

Встановлено, що раціональним способом введення ХДМ у технології харчових продуктів з поліфазною структурою є жирові суспензії, зокрема

технології хліба, пряників, печива, м'ясних посічених виробів (котлети, біфштекси з яловичини) та десертів з сиру кисломолочного. Визначено раціональні параметри отримання ЖС, до складу якої входить соняшникова олія та ХДМ у співвідношенні олія:ХДМ=50 мас.:%:50 мас.:%: ретельне перемішування суміші ($n=2,0...2,2 \text{ c}^{-1}$) за температури $t=45...50^\circ\text{C}$ протягом $\tau=(3...4)\times 60 \text{ c}$. Відзначено, що введення ХДМ до рецептури хлібобулочних, борошняних кондитерських, м'ясних посічених виробів та десертів із сиру кисломолочного приведе до скорочення часу випікання хліба на $(20...25)\times 60 \text{ c}$ та сприятиме стабілізації споживних властивостей готових виробів протягом зберігання. При цьому раціональна масова частка ХДМ дорівнює 0,15% від маси борошна для житньо-пшеничного хліба (або від маси рецептурної суміші для заварних пряників, вівсяного печива, сиркового десерту) та 0,10% від маси рецептурної суміші для м'ясних посічених виробів.

Доведено функціональність ХДМ у технології м'ясних посічених виробів: підвищуються водозв'язуюча та водоутримуюча здатність в 1,28...1,32 раза, що приводить до формування соковитої та ніжної консистенції, зниження втрат під час теплової обробки на 5,0...6,0% і підвищення виходу готової продукції на 5,0...6,0%; підвищення жирозв'язуючої та жирутримуючої здатності в 1,26...1,29 раза, жироемульгуючої здатності в 1,24...1,26 раза та стійкості емульсій в 1,22...1,24 раза покращує в'язкопластичні властивості фаршів (зростає граничне напруження зсуву в 1,30...1,35 раза; збільшуються: пластична в'язкість в 1,36...1,40 раза, коефіцієнт консистенції в 1,12...1,15 раза, ефективна в'язкість в 1,6...1,7 раза, високопластичний модуль в 1,15...1,17 раза, модуль миттєвої пружності в 1,18...1,22 раза), що зумовлює м'яку консистенцію та покращує формоутримуючу здатність фаршевих систем. Визначено, що введення ХДМ функціонально впливає на структурно-механічні характеристики десерту із сиру кисломолочного: зі зростанням масової частки ХДМ збільшується максимальне напруження зсуву в

1,18...1,3 раза порівняно з контролем, зростає коефіцієнт тиксотропії в 1,26 раза. Встановлено, що такий характер впливу позитивно позначається на текстурі продукту.

Доведено, що для функціонування ХДМ у технологіях виробів пінної та гелеподібної структури, зокрема формового желейного мармеладу, зефіру біло-рожевого, збитих ягідно-плодових десертів (мусів, самбуків), раціональним способом введення ХДМ є водні суспензії наночастинок зі структуроутворювачами (желатин, агар, пектин). Визначено раціональні параметри утворення ВС: ГМ=1:18:1; $t_1=15...18^\circ\text{C}$; $n_1=2,0...2,2 \text{ c}^{-1}$; $\tau_1=(30...40)\times 60 \text{ c}$ для желатину, $\tau_1=(25...30)\times 60 \text{ c}$ для агару, $\tau_1=(35...40)\times 60 \text{ c}$ для пектину; $t_2=60...65^\circ\text{C}$ для желатина, $t_2=95...100^\circ\text{C}$ для агара, $t_2=85...90^\circ\text{C}$ для пектина; $n_2=2,0...2,2 \text{ c}^{-1}$; $\tau_2=(2...3)\times 60 \text{ c}$. Розроблено технології та вивчено органолептичні показники харчової продукції з використанням ХДМ: ягідно-плодових десертів – мусу «Малинка» і самбуку «Ягідка»; формового желейного мармеладу на агарі «Ранок» і на пектині «Веселка»; зефіру біло-рожевого на агарі «Весна» і на пектині «Літо». Визначено дисперсні характеристики пінних структур у десертах із сиру кисломолочного, з ягідно-плодової сировини (муси, самбуки) та в зефірних масах за умови введення ХДМ: функція розподілу повітряних пухирців за діаметром вузька та симетрична, діаметр $d=(45...50)\cdot 10^{-3} \text{ м}$ є переважаючим чинником, тобто наночасинки ХДМ забезпечують стабільність піни.

Доведено, що використання водних суспензій ХДМ (на етапі набрякання-розчинення гелеутворювача) у технологіях виробів гелеподібної структури (формового желейного мармеладу на агарі й пектині) функціонально впливає на структурно-механічні характеристики мармеладу: збільшує в'язкість в 1,3...1,4 раза, швидкість структурування желейних мас в 1,3...1,4 раза; підвищує коефіцієнт тиксотропії в 1,4...1,5 раза; зміцнює просторовий каркас гелю в 1,3...1,5 разів, що позитивно позначається на текстурі продукту та подовженні терміну збереження його свіжості. Крім того, під час зберігання (75 діб) уповільнюється втрата вологи на 11...18%

(порівняно з контролем) у таких умовах: відносна вологість повітря $\phi=(75\pm 2)\%$, температура $t=(18\pm 2)^\circ\text{C}$. Доведено, що в технології мармеладу желейного формового можна зменшити кількість агару на 9...11% і пектину на 7...9%.

Встановлено, що під час вироблення продукції пінної структури, зокрема зефіру біло-рожевого, наночастинки ХДМ, що містяться у ВС, виконують роль стабілізаторів піни та збільшують піноутворюючу здатність в 1,2...1,4 раза, забезпечують піностійкість на рівні $(99\pm 1)\%$. Доведено, що використання ХДМ у вигляді ВС приводить до утворення стійкої пінної структури ягідно-фруктових десертів (збільшується піноутворююча здатність мусів в 1,22...1,3 раза і самбуків в 1,23...1,38 раза; стійкість піни становить $(99\pm 1)\%$) і збільшення механічної міцності структури десертних пінних систем в 1,21...1,25 раза.

Доклінічними дослідженнями доведено, що ХДМ не бере участі в метаболізмі й не має токсичної дії на організм; належить до IV класу токсичності (малотоксичні речовини, $LD_{50} > 5000$ мг/кг); встановлений цитопротекторний ефект добавки в малих концентраціях введення (0,02 мг/мл і 0,002 мг/мл) є додатковим підтвердженням антиоксидантної активності ХДМ.

У ході SWOT-аналізу встановлено, що найбільш сильними сторонами харчової продукції з використанням ХДМ є унікальність пропозиції та патентна захищеність, слабкими – низький рівень інформованості споживачів про нові продукти та ризики виробників у разі впровадження нової продукції. Доведено, що запровадження розроблених технологій забезпечує високий рівень наукоємності продукції, абсолютні значення якої 0,78...1,09% в 1,05...1,50 раза перевищують відповідні показники за видами економічної діяльності в Україні (0,75%). Доведена більша цінність нових продуктів для споживачів сегмента B2C порівняно з продуктами-аналогами. Визначено, що додатковий прибуток за умови впровадження інноваційної продукції у виробництво становитиме до 4,4 тис. грн на кожні 1000 кг інноваційної

продукції.

Розроблено і затверджено нормативну документацію на ХДМ та нові продукти з її використанням. Проведено роботу з їх упровадження у виробничу діяльність підприємств харчової промисловості, ресторанного господарства України та в освітній процес.

Ключові слова: харчова добавка «Магнетофуд», наночастинки оксидів заліза, харчова продукція з поліфазною структурою, кластерофільність, Пікерінг-стабілізація.

ANNOTATION

Tsykhanovska I. Scientific substantiation of foodstuffs technology with polyphase structure using nanoparticles of iron oxides. – Manuscript.

Thesis for the competition of a degree of Doctor of Engineering by specialty 05.18.16 – Food Products Technology. – Kharkiv State University of Food Technol-ogy and Trade of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The dissertation is devoted to the substantiation of scientific bases and development of practical decisions concerning the use of functional and technological potential of mineral nanoparticles in food products with polyphase structure, which will allow to improve consumer properties of finished products. For this purpose, the concept of work is proposed: functional and technological potential of mineral nanoparticles, in particular iron oxides, formed in the course of production, caused by physico-chemical parameters and colloidal properties, is the basis for the improvement and development of knowledge-intensive food nanotechnologies adapted to various manufacturing conditions (food industry enterprises, restaurants, etc.), improvement of quality indicators, extension of the shelf life of foodstuffs and obtaining added cost.

It is determined that chemical condensation technology is effective and allows to regulate physico-chemical properties of nanoparticles based on iron

oxides. Rational parameters of the technological process of nanoparticles formation with a target size of 70... 80 nm are established. Such conditions and parameters are: use of 10% solutions of salts of di- and trivalent ferrous in alkaline medium (pH=10... 11) at a temperature $t = (50 \pm 5) ^\circ\text{C}$ and 1,7...1,8 times excess salt of Fe (II) and 10.0...10,5 times excess $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ alkali; the ratio of $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}=2:1,75$. The proven technology allows to obtain nanoparticles with a diameter distribution close to monodispersity.

Physico-chemical parameters of the “Magnetofood” food additive are determined, which prove that at a ξ -potential of 34 mV...44 mV, diameter of 70... 80 nm, molar mass of 230,8 g/mol, iron content in mass percent of at least 90% and moisture of 10% provide functional and technological properties of food products, which are resistant to external factors of storage and oxidation.

The regularities of the formation of nanoparticle-macromolecular complex (protein, polysaccharide, fat) that occur through electrostatic interaction and coordination (donor-acceptor) bonding are determined. Analysis of these interactions by means of “clathrate” models revealed the potential of nanoparticles (NPs) for the formation of a number of complexes by the types “cluster”, “clathrate”, and “cavitate“, “complex-sandwich. These models made it possible to predict the provision of such nanoparticle properties as amphiphilicity and “clusterophilicity”, and introduction of LF into food products with polyphase structure – technological stability of heterogeneous structure by Pickering or steric stabilization.

Such physico-chemical parameters of FAM nanoparticles as the minimum surface charge density (pH=6,8...7,0), Van-der-Waals interaction energy (5...30 kJ/mol), and hydrogen bond energy (20...70 kJ/mol) providing such functional and technological property as stabilization of dispersions containing polar and non-polar liquids, i.e. stable emulsions, suspensions, pastes, creams, etc. are determined. It is found that the formation of stable dispersed systems, which include organic compounds and water, through ionic and dipole-ion interactions occurs due to a sufficiently high coordination energy of 50...200 kJ/mol.

The increase by 1,2...1,3 times on average in stability of such colloidal systems, such as emulsions, is experimentally proven, which is caused by the detected interaction of FAM nanoparticles with carbohydrates, proteins, oils, fats and higher fatty acids and their salts, which leads to spatial structuring.

It is proven that the ability of FAM nanoparticles to polarization, electrostatic coordination and manifestation of these properties in the systems containing proteins and polysaccharides (carbohydrates), stipulates water-holding capacity of FAM, the regularities of which are described by the physico-chemical model of cluster-loop type. Considering the polarity of FAM nanoparticles and the dipole nature of H₂O molecules, a “cluster-capillary” model is proposed. It is intended to justify the functions of FAM in polysaccharide (carbohydrate) solutions. A two-layer coordination model for the mechanism of FAM fat-binding and fat-holding capacity by forming coordination and Van-Der-Waals complexes are developed and proved. The models of interaction of FAM nanoparticles with polar and nonpolar liquids and molecules are developed. ξ -potential – 34...44 mV, which is a theoretical basis for assertion of structure-forming and stabilizing ability of FAM in food systems is experimentally determined.

It is revealed that the general functional and technological property of FAM nanoparticles is antioxidant. In addition, they affect the thickening and thixotropic properties of food systems as a whole.

The regularities, mechanisms and rational mass fractions of FAM are found, which, in case of introduction of food production into the technological process, are preliminary transferred into polydisperse state in the form of fatty (FS) and aqueous (AS) suspensions. Functional and technological properties (FTP) of food products with FAM are determined, and correlation between these properties and mechanisms of hydration, dissolution, formation of molecular layers, clusters and clathrates due to the surface activity of FAM nanoparticles is established.

It is found that introduction of FAM in the form of FS is a rational method of technologies in which the following polyphase dispersed systems are formed during the technological process: emulsions, suspensions, foams. Such

technologies include flour products (bread, gingerbread cookies, bisquits), minced meat products (cutlets, beef steaks) and sour milk desserts. Rational parameters for the production of FS, which includes sunflower oil and FAM in the ratio oil:FAM are determined: 50 wt. %:50 wt. %: thorough mixing the mixture ($n=2,0 \dots 2,2 \text{ s}^{-1}$) at a temperature $t=45 \dots 50^\circ\text{C}$ for $\tau=(3 \dots 4) \times 60 \text{ s}$. It is noted that the involvement of FAM nanoparticles into the technological process of bakery, flour confectionery, meat-chopped and sour-milk desserts will shorten the technological cycle of baking bread by $(20 \dots 25) \times 60 \text{ s}$ and will help stabilize consumption properties of the finished products during storage. The rational mass fraction of FAM is 0,15% by weight of flour for rye-wheat bread (or by weight of the recipe mix for gingerbread cookies, oatmeal, cheese dessert) and 0,10% by weight of the recipe mix for meat chopped products.

Functionality of FAM in the technology of meat chopped products is proved: the water-binding and water-holding capacity increases by 1,28...1,32 times, which leads to the formation of a juicy and gentle consistency, reducing losses during heat treatment by 5,0...6,0% and increase in the output of finished products by 5,0...6,0%; increase of fat-soluble and fat-holding capacity by 1,26...1,29 times, fat-emulsifying ability by 1,24...1,26 times and stability of emulsions by 1,22...1,24 times improves visco-plastic properties of minced meat (increasing stress displacement by 1,30...1,35 times; increase: plastic viscosity by 1,36...1,40 times, coefficient of consistency by 1,12...1,15 times, effective viscosity by 1,6...1,7 times, high-plastic module by 1,15...1,17 times, instant elasticity module by 1,18 ... 1,22 times), which causes soft consistency and improves form-holding capacity of minced systems. It is determined that introduction of FAM functionally affects structural and mechanical characteristics of the dessert of lactic cheese: with the increase of the mass fraction of FAM, the maximum shear stress increases by 1,18...1,3 times compared to the control, the thixotropy coefficient increases by 1,26 times. It is established that such influencely positive effects the texture of the product.

It is proved that for the functioning of FAM in the technologies of products

of foam and gel-like structure, in particular molded jelly marmalade, white marshmallow, whipped berry-fruit desserts (mousses, sambucks), formation of aqueous suspensions (AS) of FAM nanoparticles with the corresponding structuring agents such as gelatin, agar, pectin. Rational parameters of the formation of AS were determined: GM=1: 18:1; $t_1=15...18^\circ\text{C}$; $n_1=2,0...2,2\text{ s}^{-1}$; $\tau_1=(30...40)\times 60\text{ s}$ for gelatin, $\tau_1=(25...30)\times 60\text{ s}$ for agar, $\tau_1=(35...40)\times 60\text{ s}$ for pectin; $t_2=60...65^\circ\text{C}$ for gelatin, $t_2=95...100^\circ\text{C}$ for agar, $t_2=85...90^\circ\text{C}$ for pectin; $n_2=2,0...2,2\text{ s}^{-1}$; $\tau_2=(2...3)\times 60\text{ s}$. The technologies are developed and organoleptic indicators of food production are studied using FAM: berry and fruit desserts – “Raspberry” mousse and “Berry” sambuca; molded jelly on agar “Morning” and on pectin “Rainbow”; white-pink marshmallow on agar “Spring” and on pectin “Summer”. The dispersive characteristics of foam structures in desserts from lactic cheese, from fruit and berry raw materials (mousse, sambuca) and in marshmallows under conditions of FAM introduction: the function of air bubbles distribution by the diameter is narrow and symmetric. Diameter $d=(45...50)\times 10^3\text{ m}$ is a predominant factor, i.e., FAM nanoparticles guarantee foam stability.

It is proved that the use of aqueous suspensions of FAM (at the stage of swelling-dissolution of the gel-forming agent) in the technologies of products of gel-like structure (molded jelly marmalade on agar and pectin) functionally affects structural and mechanical characteristics of marmalade: increases the viscosity by 1,3...1,4 times, the rate of structuring of jelly masses is 1,3...1,4 times. It increases the thixotropy coefficient by 1,4...1,5 times; strengthens spatial frame of gel by 1,3...1,5 times, which positively influences the texture of the product and the extension of its shelf life. In addition, during storage (75 days), the moisture loss slows down by 11...18% (compared to control) under the following conditions: relative air humidity $\varphi=(75\pm 2)\%$, temperature $t = (18\pm 2)^\circ\text{C}$. It is proved that in the technology of jelly mold marmalade it is possible to reduce the amount of agar by 9...11% and pectin by 7...9%.

It is found that during the production of products with foam structure, in particular white and pink marshmallow, FAM nanoparticles contained in the AC

act as foam stabilizers and increase foaming capacity by 1,2...1,4 times, providing foam resistance at the level $(99 \pm 1)\%$. It is proved that the use of FAM in the form of AS leads to the formation of a stable foamy structure of berry-fruit desserts (increases mousses foaming capacity by 1,22...1,3 times and that of sambucs by 1,23...1,38 times. The foam stability is $(99 \pm 1)\%$), and increase of mechanical strength of the structure of dessert foam systems grows by 1,21...1,25 times.

Preclinical research proved that FAM is not involved in metabolism and has no toxic effect on the body; belongs to Class IV toxicity (low toxicity, $LD_{50} > 5000$ mg/kg). Cytoprotective effect of the additive in low concentrations of introduction (0.02 mg/ml and 0.002 mg / ml) is an additional confirmation of the antioxidant activity of FAM.

During the SWOT analysis, it was determined that the most important strengths of foodstuffs with the use of FAM are the uniqueness of the offer and patent protection, the weaknesses – low level of consumer awareness about new products and the risks of producers in case of new products introduction. It is proved that the introduction of the developed technologies provides high level of scientific intensity of production, absolute values of which are 0.78...1.09%, in 1,05...1.50 times higher than the corresponding indicators by the types of economic activity in Ukraine (0.75%). The greater value of new products for the consumers of B2C segment is proven compared to analogue products. It is determined that the additional profit, provided the introduction of innovative products into production would amount to 4,4 thousand UAH for every 1000 kg of innovative products.

Regulatory documentation for FAM and new products with its use are developed and approved. Work on their introduction into the production activity of food industry enterprises, restaurant industry of Ukraine and in the educational process has been carried out.

Keywords: food additive “Magnetofood”, iron oxides nanoparticles, food products with polyphase structure, clusterophilicity, Pickering-stabilization.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Цихановська І. В., Александров О. В., Барсова З. В., Дуденко Н. В., Павлоцька Л. Ф., Скуріхіна Л. А. Одержання та дослідження властивостей біологічно-активних добавок на основі ліпідно-магнетитових суспензій // Повноценне харчування: інноваційні аспекти технології, енергоефективного виробництва, зберігання та маркетингу: колективна монографія. Харків: ХДУХТ, 2015. С. 138–167. *Внесок здобувача: визначення теоретичних та практичних аспектів дослідження, формулювання гіпотези та її експериментальне підтвердження.*

2. Цихановська І. В., Александров О. В., Лазарева Т. А., Гонтар Т. Б., Павлоцька Л. Ф. Використання жирно-магнетитової суспензії для підвищення харчової цінності цукерок «Сухофрукти в шоколаді», збагачених залізовмісною харчовою добавкою // Повноцінне харчування: інноваційні аспекти технології, енергоефективного виробництва, зберігання та маркетингу: колективна монографія. Харків: ХДУХТ, 2016. С. 143–170. *Внесок здобувача: керівництво дослідженнями з визначення технологічних параметрів та режимів отримання жирно-магнетитової суспензії та цукерок «Сухофрукти в шоколаді» з ХД «Fe₃O₄», узагальнення одержаних даних, формулювання висновків.*

3. Alexandrov A., Tsykhanovska I., Evlash V., Lazareva T., Svidlo K., Gontar T. Formation of the quality of the rzhno-wheat bread with addition of the polyfunktanical food additives «Magnetofood» // New Technologies of Food Production: Raw Materials, Additives, Quality: collective monograph. Beau-Bassin: LAP LAMBERT. Academic Publishing, 2018. P. 243–297. *Внесок здобувача: постановка проблеми та мети дослідження, формулювання висновків щодо впливу ХД «Магнетофуд» на технологічні, структурно-механічні та фізико-хімічні характеристики тіста й органолептичні показники хліба, у тому числі в процесі зберігання.*

4. Левитин Е. Я., Ведерникова И. А., Оноприенко Т. А., Цихановская

И. В. Изучение структуры и температурных превращений синтезированных частиц магнетита // Фармаком. 2007. № 1. С. 61–63. *Внесок здобувача: дослідження та визначення температурних перетворень Fe_3O_4 методами диференційно-термічного та термогравіметричного аналізу, аналіз результатів дослідження.*

5. Левитин Е. Я., Ведерникова И. А., Александров А. В., Цихановская И. В., Довгопол И. В., Антоненко О. В. Исследование электроповерхностных свойств магнетитовых дисперсных систем на водной основе // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2007. № 3/4 (27). С. 16–18. *Внесок здобувача: визначення закономірностей між величиною ξ -потенціалу і стійкістю водних суспензій різного складу з наночастинками Fe_3O_4 , узагальнення результатів.*

6. Левитин Е. Я., Ведерникова И. А., Александров А. В., Цихановская И. В., Довгопол И. В., Панаётова Т. Д. Магнитные жидкости: исследование седиментационной и агрегативной устойчивости // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2007. № 3/4 (27). С. 22–26. *Внесок здобувача: визначення закономірностей між седиментаційною й агрегативною стійкістю водних суспензій різного складу з наночастинками Fe_3O_4 , узагальнення результатів.*

7. Ілюха М. Г., Барсова З. В., Тімофєєва В. П., Цихановська І. В., Ведерникова І. О. Нанохімічна технологія магнетиту // Хімічна промисловість України. 2009. № 5(94). С. 37–41. *Внесок здобувача: обґрунтування шляхом термодинамічних розрахунків технологічних параметрів та режимів виробництва наночастинок Fe_3O_4 , керівництво експериментальними дослідженнями.*

8. Ілюха Н. Г., Цихановская И. В., Барсова З. В., Коваленко В. А. Технология производства и показатели качества пищевой добавки на основе магнетита // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. № 6/10 (48). С. 32–35. *Внесок здобувача: аналіз сучасних методів одержання*

феритових наночастинок, обґрунтування та розробка технологічних параметрів виробництва харчової добавки, визначення мікробіологічних показників добавки та узагальнення результатів дослідження.

9. Цихановская И. В., Денисова А. Ю., Скородумова О. Б., Левитин Е. Я., Коваленко В. А., Александров А. В., Барсова З. В. Изучение растворимости магнетита в условиях, имитирующих пищеварительные процессы желудочно-кишечного тракта // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. № 6/6 (60). С. 29–31. **Стаття у фаховому виданні України.** *Внесок здобувача: планування експериментальних досліджень з визначення кінетики розчинення наночастинок Fe_3O_4 у кислому середовищі ($pH=1,8...5,0$), узагальнення результатів, формулювання висновків.*

10. Александров О. В., Цихановська І. В., Барсова З. В., Ілюха М. Г. Визначення ефективності використання магнетиту в ліпідо-магнетитових суспензіях // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2014. № 3/6 (69). С. 4–8. **Стаття у фаховому виданні України.** *Внесок здобувача: постановка проблеми, планування експериментальних досліджень з визначення механізму стійкості жирових суспензій з наночастинками Fe_3O_4 , формулювання висновків.*

11. Александров А. В., Цихановская И. В., Барсова З. В. Синтез и исследование кинетики растворения магнетита в модельных средах // Технологічний аудит та резерви виробництва. 2015. № 5/7 (25). С. 31–32. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних.** *Внесок здобувача: розробка алгоритму дослідження, формулювання висновків.*

12. Цихановська І. В., Демидов І. М., Барсова З. В., Павлоцька Л. Ф. Дослідження процесів окиснювальних та термічних перетворень в системі: олія-ліпідо-магнетитова суспензія // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць /

Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків: ХДУХТ, 2015. Вип. 1 (21), С. 353–362.
Внесок здобувача: постановка проблеми та визначення мети дослідження, формулювання висновків щодо залежності ступеня окиснення жирів від дії наночастинок Fe_3O_4 .

13. Alexandrov A., Tsykhanovska I., Gontar T., Kokodiy N., Dotsenko N. The study of nanoparticles of magnetite of the lipid-magnetite suspensions by methods of photometry and electronic microscopy // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2016. № 4/11 (82). P. 51–61. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних (Scopus).** *Внесок здобувача: наукове обґрунтування та експериментальне підтвердження спектрофотометричної методики визначення кількості частинок у магнетофудово-жировій суспензії та її стійкості, узагальнення результатів.*

14. Alexandrov A., Tsykhanovska I., Gontar T., Kokodiy N. Research of sedimentation stability of lipid–magnetite suspensions by the method of spectrophotometry // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. № 3/11 (81). P. 4–15. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних (Scopus).** *Внесок здобувача: розробка алгоритму дослідження стабілізації жирових суспензій з наночастинками Fe_3O_4 , формулювання висновків.*

15. Alexandrov A., Tsykhanovska I., Gontar T., Kokodiy N., Dotsenko N. Stability and morphological characteristics of lipid – magnetite suspensions // Eureka: Life Sciences. 2016. Vol. 3 (3). № 3. P. 14–25. **Стаття у науковому періодичному виданні Естонської Республіки.** *Внесок здобувача: дослідження морфологічних характеристик жирових суспензій з НЧ Fe_3O_4 , узагальнення отриманих даних.*

16. Цихановська І. В., Демидов І. М., Александров О. В., Гонтар Т. Б., Павлоцька Л. Ф. Дослідження впливу біологічно активної добавки на процеси окиснення ліпідів // Прогресивні техніка та технології харчових

виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків: ХДУХТ, 2017. Вип. 2 (26). С. 251–262.

Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних. *Внесок здобувача: керівництво дослідженнями з визначення антиоксидантної дії наночастинок Fe_3O_4 , узагальнення одержаних даних.*

17. Цихановська І. В., Скуріхіна Л. А., Александров О. В., Гонтар Т. Б. Дослідження впливу біологічно активної добавки на якість м'ясних посічених напівфабрикатів // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків: ХДУХТ, 2017. Вип. 1 (25), С. 302–313.

Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних. *Внесок здобувача: дослідження впливу наночастинок Fe_3O_4 на показники якості м'ясних посічених напівфабрикатів, формулювання висновків.*

18. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Svidlo K., Gontar T.. Influence of the polyfunctional food supplement «Magnetofood» on the quality of the wheat-rye bread «Kharkiv Rodnichok» in the storage process // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. № 5/11 (89). P. 61–70.

Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних (Scopus). *Внесок здобувача: наукове обґрунтування рецептурного складу житньо-пшеничного хліба з харчовою добавкою «Магнетофуд», узагальнення одержаних даних.*

19. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Svidlo K., Gontar T. Design of technology for the rye-wheat bread «Kharkivski rodnichok» with the addition of polyfunctional food additive «Magnetofood» // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. № 6/11 (90). P. 48–58.

Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних (Scopus). *Внесок здобувача: наукове*

обґрунтування та експериментальне підтвердження технологічних параметрів та режимів виробництва житньо-пшеничного хліба «Харківський родничок» з харчовою добавкою «Магнетофуд», узагальнення результатів та формулювання висновків.

20. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Svidlo K., Gontar T. Research quality of the wheat-rye bread with addition of the polyfunctional food supplement «Magnetofood» // Eureka: Life Sciences. 2017. Vol. 5 (11). № 5. P. 45–52. **Стаття у науковому періодичному виданні Естонської Республіки.** *Внесок здобувача: узагальнення результатів досліджень щодо раціональної кількості ХД «Магнетофуд» у рецептурі житньо-пшеничного хліба та її впливу на функціонально-технологічні властивості тіста та показники якості виготовленого з нього хлібу, формулювання висновків.*

21. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Svidlo K., Gontar T. Research into technological indicators of a rye-wheat dough semi-finished product with the addition of the polyfunctional food supplement «Magnetofood» // Eureka: Life Sciences. 2017. Vol. 6 (12). № 6. P. 43–50. **Стаття у науковому періодичному виданні Естонської Республіки.** *Внесок здобувача: дослідження впливу ХД «Магнетофуд» на органолептичні, фізико-хімічні та структурно-механічні показники житньо-пшеничного хліба, узагальнення результатів.*

22. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Svidlo K., Gontar T., Yurchenko L., Pavlotska L. Substantiation of the mechanism of interaction between biopolymers of rye-and-wheat flour and the nanoparticles of the «Magnetofood» food additive in order to improve moisture-retaining capacity of Dough // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. № 2/11 (92). P. 70–80. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних (Scopus).** *Внесок здобувача: наукове обґрунтування та планування експериментальних досліджень із доведення механізму водозв'язуючої та водоутримуючої здатності*

наночастинками «Магнетофуд» у тісті, узагальнення результатів.

23. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Yevlash T.. Substantiation of the mechanism of interaction of between the carbohydrates of rye-wheat flour and nanoparticles of the polyfunctional food additive «Magnetofood» // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. № 3 /11 (93). P. 59–68. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних (Scopus).** *Внесок здобувача: наукове обґрунтування та експериментальне підтвердження «кластерно-капілярного» механізму водозв'язуючої та водоутримуючої здатності наночастинками «Магнетофуд» у вуглеводних системах, узагальнення одержаних даних та формулювання висновків.*

24. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Bryzytska O. Substantiation of the interaction between the lipo- and glucoproteids of rye-wheat flour and nanoparticles of the food additive «Magnetofood» // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. № 4/11 (94). P. 61–68. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних (Scopus).** *Внесок здобувача: визначення механізму водозв'язуючої та водоутримуючої здатності наночастинок «Магнетофуд» на модельних системах, що містять складні білки.*

25. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Svidlo K., Gontar T., Yurchenko L., Pavlotska L. Investigation of the moisture-retaining power of rye-wheat gluten and flour with polyfunctional food supplement «Magnetofood» // Eureka: Life Sciences. 2018. Vol. 2 (14). № 2. P. 67–76. **Стаття у науковому періодичному виданні Естонської Республіки.** *Внесок здобувача: дослідження впливу ХД «Магнетофуд» на функціонально-технологічні властивості, зокрема водоутримуючу здатність житньо-пшеничного борошна, узагальнення отриманих даних.*

26. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Yevlash T. Investigation of the water-retaining capacity of the carbohydrate complex of rye-

wheat dough with addition of polyfunctional food supplement «Magnetofood» // Eureka: Life Sciences. 2018. Vol. 3 (15). № 3. P. 56–64. **Стаття у науковому періодичному виданні Естонської Республіки.** *Внесок здобувача: дослідження впливу ХД «Магнетофуд» на форми зв'язку вологи в житньо-пшеничному тісті, узагальнення результатів.*

27. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Bryzytska O. Investigation of the water-retaining capacity of the carbohydrate complex of rye-wheat dough with addition of polyfunctional food supplement «Magnetofood» // Eureka: Life Sciences. 2018. Vol. 4 (16). № 4. P. 63–68. **Стаття у науковому періодичному виданні Естонської Республіки.** *Внесок здобувача: дослідження впливу ХД «Магнетофуд» на функціонально-технологічні властивості житньо-пшеничного тіста, формулювання висновків.*

28. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Gontar T. Mechanism of fat-binding and fat-contenting of the nanoparticles of a food supplement on the basis of double oxide of two- and trivalent iron // Ukrainian Food Journal. 2018. Vol. 7. № 4. P. 702–715. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних (Web of Science).** *Внесок здобувача: визначення жирозв'язування та жируотримання НЧ «Магнетофуд», формулювання висновків. L.*

29. Tsykhanovska I., Skurikhina, Evlash V., Pavlotska L. Formation of the functional and technological properties of the beef minced meat by using the food additive on the nanopowder basis of double oxide of two- and trivalent iron // Ukrainian Food Journal. 2018. Vol. 7. № 3. P. 379–396. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних (Web of Science).** *Внесок здобувача: наукове обґрунтування та експериментальне підтвердження взаємозв'язку між фізико-хімічними властивостями НЧ «Магнетофуд» та функціонально-технологічними показниками м'ясних посічених виробів, узагальнення експериментальних даних.*

30. Yurchenko L., Tsykhanovska I., Prikhodko E. Technique of low temperature processing of ground beef meat semi-finished products, modified with food supplement «Magnetofood» // Problems of Cryobiology and Cryomedicine. 2018. № 28 (2). P. 190. **Стаття у виданні, включеному до міжнародних наукометричних баз даних (Scopus).** *Внесок здобувача: дослідження впливу наночастинок харчової добавки «Магнетофуд» (Fe_3O_4) на процеси заморожування-розморожування м'ясної сировини.*

31. Цихановська І. В., Євлаш В. В., Скуріхіна Л. А., Павлоцька Л. Ф. Удосконалення технології біфштексів з яловичини з використанням харчової добавки «Магнетофуд» // Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Технічні науки / ПУЕТ. Полтава, 2018. № 1 (85). С. 39–50. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних.** *Внесок здобувача: наукове обґрунтування параметрів та моделі технологічної системи виробництва.*

32. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Khamitova B., Svidlo K., Nechuiviter O. Forming the structure of whipped desserts when introducing the food additive «Magnetofood» to their formulation // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. № 2/11 (98). P. 45–55. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних (Scopus).** *Внесок здобувача: планування експериментальних досліджень з визначення впливу наночастинок «Магнетофуд» на формування структурно-механічних властивостей збитих ягідно-плодових десертів, формулювання висновків.*

33. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Khamitova B., Svidlo K., Nechuiviter O. Improving the technique of scrambled desserts using the food supplement «Magnetofood» // Eureka: Life Sciences. 2019. Vol. 2 (20). № 2. P. 40–48. **Стаття у науковому періодичному виданні Естонської Республіки.** *Внесок здобувача: планування експериментальних досліджень із визначення раціональних параметрів виробництва збитих ягідно-плодових*

десертів, формулювання висновків.

34. Tsykhanovska I., Yevlash V., Khamitova B., Urazbaieva K., Aleksandrov O., Kaida N. Influence of the «Magnetofood» food supplement on the structural and mechanical properties of molded fruit jelly with various structure-forming agents // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Нові рішення в сучасних технологіях / НТУ «ХПІ». Харків, 2019. № 5 (1330). С. 175–186. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних.** *Внесок здобувача: узагальнення сучасних відомостей про способи наномодифікації властивостей гелеподібних мас, визначення взаємозв'язку між їх структурою та функціонально-технологічними властивостями в разі внесення НЧ «Магнетофуд».*

35. Tsykhanovska I. Development of molded jelly marmelad technology with the introduction of food additive «Magnetofood» // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Нові рішення в сучасних технологіях / НТУ «ХПІ». Харків, 2019. № 10 (1335). С. 109–119. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних.**

36. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Gontar T. Dissolution kinetics of Fe_3O_4 nanoparticles in the acid media // Chemistry & Chemical technology. 2019. Vol. 13. № 2. P. 170–184. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних (Scopus).** *Внесок здобувача: розробка алгоритму дослідження обмеженої розчинності НЧ харчової добавки «Магнетофуд» (Fe_3O_4) у кислому середовищі, визначення механізму розчинення, узагальнення отриманих результатів.*

37. Цихановська І. В., Євлаш В. В., Лазарева Т. А., Шингісов А. У. Дослідження структурно-механічних показників та піноутворення зефірних мас з різними структуроутворювачами при введенні в рецептуру харчової добавки «Магнетофуд» // Праці Таврійського державного агротехнологічного

університету / ТДАТУ. Мелітополь, 2019. Т. 2. Вип. 19. С. 168–189. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних.** *Внесок здобувача: узагальнення результатів досліджень щодо впливу ХД «Магнетофуд» на структурно-механічні показники та піноутворення зефірних мас із різними структуроутворювачами.*

38. Александров О. В., Цихановська І. В., Кайда Н. С., Євлаш В. В. Розробка рецептури сиркового десерту «Слоненя» з використанням харчової добавки «Магнетофуд» // Наукові праці Національного університету харчових технологій / НУХТ. Київ, 2019. Т. 25. № 1. С. 169–179. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних.** *Внесок здобувача: наукове обґрунтування рецептурного складу десерту із сиру кисломолочного, формулювання висновків.*

39. Цихановська І. В., Євлаш В. В., Александров О. В., Кайда Н. С., Коваленко З. І. Удосконалення технології зефіру біло-рожевого з використанням харчової добавки «Магнетофуд» // Наукові праці Національного університету харчових технологій / НУХТ. Київ, 2019. Т. 25. № 2. С. 186–203. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних.** *Внесок здобувача: розробка алгоритму дослідження структурно-механічних, технологічних характеристик та показників якості й безпеки зефіру біло-рожевого зі ХДМ, формулювання висновків.*

40. Цихановська І. В. Удосконалення технології вівсяного печива шляхом введення до рецептури харчової добавки «Магнетофуд» на основі дво- та тривалентного заліза // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2019. Вип. 1 (29). С. 43–56. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз**

даних.

41. Kruhlova O., Yevlash V., Tsykhanovska I., Alexandrov A., Yevlash T. SWOT Analysis of innovative products containing food additive «Magnetofood» // Технологічний аудит та резерви виробництва. 2019. № 3/4 (47). С. 4–11. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних.** *Внесок здобувача: розробка алгоритму дослідження, формулювання висновків.*

42. Tsykhanovska I. Formation of functional and technological properties of flour dough and quality of finished products in the technology of custard gingerbread with the use of «Magnetofood» food additive // Технологічний аудит та резерви виробництва. 2019. № 3/3 (47). С. 26–32. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних.**

43. Tsykhanovska I. The formation of functional and technological properties of the dough and quality indicators of oatmeal cookies with the use of «Magnetofood» food additive // Технологічний аудит та резерви виробництва. 2019. № 4/3 (48). С. 26–30. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних.**

44. Tsykhanovska I., Skurikhina L., Evlash V., Pavlotska L. Influence of food additive «Magnetofood» on physical and chemical parameters, functional properties of model minced meat systems // Food Science and Technology. 2019. Vol. 13. Issue 2. P. 87–96. **Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних (Web of Science).** *Внесок здобувача: дослідження впливу ХД «Магнетофуд» на структурно-механічні, технологічні та фізико-хімічні показники м'ясних фаршів з яловичини, узагальнення отриманих даних.*

45. Kruhlova O., Yevlash T., Evlash V., Tsykhanovska I., Potapov V. Comprehensive analysis of food production efficiency using nanoparticles of nutritional supplements on the basis of oxides of two and three valence iron

«Magnetofood» // Ukrainian Food Journal. 2019. Vol. 8. Issue 2. P. 400–416.

Стаття у фаховому виданні України, включеному до міжнародних наукометричних баз даних (Web of Science). Внесок здобувача: експериментальне підтвердження робочої гіпотези, узагальнення отриманих даних.

46. Спосіб одержання рослинної олії з залізовмісною антиоксидантною добавкою: пат. на кор. модель 120971 Україна: МПК (2006.01) A23 D 9/02, A23 D 7/02 / Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В., Гонтар Т. Б., Шматков Д. І.; патентовласник УПА. № u201705246; заявл. 29.05.2017; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22. 4 с. *Внесок здобувача: патентний пошук сучасних способів одержання олій, розробка формули винаходу та його опис.*

47. Спосіб одержання рослинної олії з залізовмісною антиоксидантною добавкою: пат. на кор. модель 120974 Україна: МПК (2006.01) A23D 9/02, C11B 1/00 / Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В., Гонтар Т. Б., Шматков Д. І.; патентовласник УПА. № u201705249; заявл. 29.05.2017; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22. 4 с. *Внесок здобувача: патентний пошук сучасних способів одержання олій з антиоксидантними добавками, розробка формули винаходу та його опис.*

48. Харчова добавка для хлібопечення: пат. на кор. модель 120975 Україна: МПК (2017.01) A21D 2/00, (2006.01) A21D 8/02 / Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В., Гонтар Т. Б., Шматков Д. І.; патентовласник УПА. № u201705251; заявл. 29.05.2017; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22. 4 с. *Внесок здобувача: патентний пошук, визначення недоліків сучасних харчових добавок для хлібопечення, розробка формули винаходу та його опис.*

49. Спосіб виробництва біологічно активної добавки: пат. на кор. модель 120979 Україна: МПК (2006.01) A21D2/36, (2016.01), A23L 33/10 / Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В., Гонтар Т. Б., Кучеренко Н. С.; патентовласник УПА. № u201705261; заявл. 29.05.2017; опубл. 27.11.201, Бюл. № 22. 4 с. *Внесок здобувача: патентний пошук сучасних*

способів одержання біологічно активних нанодобавок, розробка формули винаходу та його опис.

50. Харчова добавка для м'ясних посічених напівфабрикатів: пат. на кор. модель 120977 Україна: МПК (2016.01) А 23L 13/40, А23L 33/10, А23L 33/115 / Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В., Гонтар Т. Б., Кучеренко Н. С.; патентовласник УПА. № u201705258; заявл. 29.05.2017; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22. 4 с. *Внесок здобувача: патентний пошук, визначення недоліків сучасних харчових добавок для м'ясних посічених виробів, розробка формули винаходу та його опис.*

51. Спосіб виробництва м'ясних посічених напівфабрикатів: пат. на кор. модель 120978 Україна: МПК (2016.01) А23L 13/40, А23L 13/60 / Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В., Гонтар Т. Б., Кучеренко Н. С.; патентовласник УПА. № u201705260; заявл. 29.05.2017; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22. 4 с. *Внесок здобувача: патентний пошук та аналіз способів виробництва м'ясних посічених виробів, розробка формули винаходу та його опис.*

52. Харчова добавка «Магнетофуд»: пат. на кор. модель 126502 Україна: МПК (2016.01) А23L 13/40, А23L 33/10 / Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В., Гонтар Т. Б., Лазарева Т. А.; патентовласник УПА. № u201800133; заявл. 03.01.2018; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12. 4 с. *Внесок здобувача: патентний пошук харчових (nanofood) добавок, розробка формули винаходу та його опис, підготовка заявки на видачу патенту.*

53. Спосіб одержання харчової добавки «Магнетофуд»: пат. на кор. модель 126507 Україна: МПК (2018.01) В82У 40/00, В82В 1/00, В82В 3/00 / Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В., Гонтар Т. Б., Лазарева Т. А.; патентовласник УПА. № u201800138; заявл. 03.01.2018; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12. 4 с. *Внесок здобувача: патентний пошук інноваційного способу одержання харчових (nanofood) добавок, розробка формули винаходу та його опис, підготовка заявки на видачу патенту.*

54. Спосіб виробництва мафінів функціонального призначення»: пат. на кор. модель 124813 Україна: МПК А21D 13/80 (2017.01), А21D 2/08 (2006.01), А21D 8/02 (2006.01) / Лазарева Т. А., Лазарєв М. І., Благій О. С., Цихановська І. В.; патентовласник УПА. № u201710646; заявл. 02.11.2017; опубл. 25.04.2018, Бюл. № 8. 4 с. *Внесок здобувача: здійснення патентного пошуку, розробка формули винаходу та його опис, підготовка заявки на видачу патенту.*

55. Склад вівсяного печива функціонального призначення: пат. на кор. модель 131897 Україна: МПК (2018.01) А21D 2/36 (2006.01), А21D 13/80 (2017.01), А21G 3/36 (2006.01), А23L 29/00 (2017.01) / Цихановська І. В., Лазарева Т. А., Євлаш В. В., Александров О. В.; патентовласник УПА. № u201806928; заявл. 20.06.2018; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3. 4 с. *Внесок здобувача: патентний пошук, розробка формули винаходу та його опис, підготовка заявки на видачу патенту.*

56. Спосіб виробництва вівсяного печива функціонального призначення: пат. на кор. модель 134685 Україна: МПК (2019.01) А21D 13/80 (2017.01), А21D 8/00, А21G 2/02 (2006.01), А23L 33/10 (2016.01) / Цихановська І. В., Лазарева Т. А., Євлаш В. В., Александров О. В.; патентовласник УПА. № u201900579; заявл. 21.01.2019; опубл. 27.05.2019, Бюл. № 10. 4 с. *Внесок здобувача: патентний пошук технології виробництва вівсяного печива, визначення його недоліків, розробка формули винаходу та його опис.*

57. Склад житньо-пшеничного хліба «Харківський струмочок»: пат. на кор. модель 134686 Україна: МПК А21D 8/02 (2006.01), А21D 2/02 (2006.01), А23L 33/10 (2016.01) / Цихановська І. В., Лазарева Т. А., Євлаш В. В.; патентовласник УПА. № u201900581; заявл. 21.01.2019; опубл. 27.05.2019, Бюл. № 10. 4 с. *Внесок здобувача: здійснення патентного пошуку рецептурного складу житньо-пшеничного хліба, розробка формули винаходу та його опис.*

58. Склад кондитерської глазури: пат. на кор. модель 134688 Україна: МПК А23G 3/20 (2006.01), А23L 33/10 (2016.01), А21D 22/02 (2006.01) / Цихановська І. В., Лазарева Т. А., Євлаш В. В.; патентовласник УПА. № u201900584; заявл. 21.01.2019; опубл. 27.05.2019, Бюл. № 10. 4 с. *Внесок здобувача: здійснення патентного пошуку рецептурного складу кондитерської глазури, виявлення його недоліків, розробка формули винаходу та його опис.*

59. Склад зефіру функціонального призначення з агаром: пат. на кор. модель 134694 Україна: МПК А23L 21/00, А23L 21/10 (2016.01) / Цихановська І. В., Лазарева Т. А., Євлаш В. В., Александров О. В., Онопрієнко Т. О.; патентовласник УПА. № u201900887; заявл. 29.01.2019; опубл. 27.05.2019, Бюл. № 10. 4 с. *Внесок здобувача: здійснення патентного пошуку рецептурного складу біло-рожевого зефіру на агарі, розробка формули винаходу та його опис.*

60. Спосіб виробництва пряників функціонального призначення: пат. на кор. модель 134695 Україна: МПК А21D 13/80 (2017.01) / Цихановська І. В., Лазарева Т. А., Євлаш В. В., Александров О. В.; патентовласник УПА. № u201900890; заявл. 29.01.2019; опубл. 27.05.2019, Бюл. № 10. 4 с. *Внесок здобувача: визначення недоліків існуючих способів виробництва заварних пряників, формулювання переваг розробленого способу, розробка формули винаходу та його опис.*

61. Склад формового желейного мармеладу функціонального призначення з агаром: пат. на кор. модель 134696 Україна: МПК (2019.01) А23L 21/00, А23L 21/10 (2016.01) / Цихановська І. В., Лазарева Т. А., Євлаш В. В., Александров О. В., Кайда Н. С.; патентовласник УПА. № u201900893; заявл. 29.01.2019; опубл. 27.05.2019, Бюл. № 10. 4 с. *Внесок здобувача: здійснення патентного пошуку рецептурного складу формового желейного мармеладу на агарі, розробка формули винаходу та його опис.*

62. Спосіб виробництва ягідно-плодового мусу функціонального

призначення: пат. на кор. модель 134697, Україна, МПК А23L 21/10 (2016.01) / Цихановська І. В., Лазарева Т. А., Євлаш В. В., Александров О. В., Кайда Н. С.; патентовласник УПА. № u201900895; заявл. 29.01.2019; опубл. 27.05.2019, Бюл. № 10. 4 с. *Внесок здобувача: здійснення патентного пошуку способу одержання ягідно-плодових мусів, розробка формули винаходу та його опис.*

63. Склад ягідно-плодового мусу функціонального призначення: пат. на кор. модель 134698 Україна: МПК (2019.01) А23L 21/00 / Цихановська І. В., Лазарева Т. А., Євлаш В. В., Александров О. В., Гонтар Т. Б.; патентовласник УПА. № u201900896; заявл. 29.01.2019; опубл. 27.05.2019, Бюл. № 10. 4 с. *Внесок здобувача: здійснення патентного пошуку рецептурного складу ягідно-плодового мусу, розробка формули винаходу та його опис.*

64. Склад зефіру функціонального призначення з пектином: пат. на кор. модель 134699 Україна: МПК (2019.01) А23L 21/00, А23L 21/10 (2016.01) / Цихановська І. В., Шматков Д. І.; патентовласник УПА. № u201900899; заявл. 29.01.2019; опубл. 27.05.2019, Бюл. № 10. 4 с. *Внесок здобувача: здійснення патентного пошуку рецептурних складів біло-рожевого зефіру на пектині, розробка формули винаходу та його опис.*

65. Склад формового желейного мармеладу функціонального призначення з пектином: пат. на кор. модель 135081 Україна: МПК (2019.01) А23L 21/00, А23L 21/10 (2016.01) / Цихановська І. В., Шматков Д. І.; патентовласник УПА. № u201900892; заявл. 29.01.2019; опубл. 10.06.2019, Бюл. № 11. 4 с. *Внесок здобувача: здійснення патентного пошуку рецептурного складу формового желейного мармеладу на пектині, виявлення його недоліків, розробка формули винаходу та його опис.*

66. Склад вівсяного печива функціонального призначення: пат. на кор. модель 135053 Україна: МПК А21D 13/80 (2017.01), А21D 2/02 (2006.01) / Цихановська І. В., Лазарева Т. А., Євлаш В. В.; патентовласник УПА. № u201900603; заявл. 21.01.2018; опубл. 10.06.2019, Бюл. № 11. 4 с. *Внесок*

здобувача: патентний пошук, визначення недоліків існуючих рецептур вівсяного печива, розробка формули винаходу та його опис.

67. Склад м'ясних посічених напівфабрикатів: пат. на кор. модель 135054 Україна: МПК А23L 13/40 (2016.01), А23L 13/60 (2016.01) / Цихановська І. В., Лазарева Т. А., Євлаш В. В.; патентовласник УПА. № u201900606; заявл. 21.01.2019; опубл. 10.06.2019, Бюл. № 11. 4 с. *Внесок здобувача: патентний пошук, визначення недоліків існуючих рецептур м'ясних посічених напівфабрикатів, розробка формули винаходу та його опис.*

68. Спосіб виробництва житньо-пшеничного хліба «Харківський родичок»: пат. на кор. модель 135056 Україна: МПК А23L 13/40 (2016.01), А21D 8/02 (2006.01), А21D 2/02 (2006.01) / Цихановська І. В., Лазарева Т. А., Євлаш В. В.; патентовласник УПА. № u201900608; заявл. 21.01.2019; опубл. 10.06.2019, Бюл. № 11. 4 с. *Внесок здобувача: патентний пошук технології виробництва житньо-пшеничного хліба, визначення його недоліків, розробка формули винаходу та його опис.*

69. Склад пряників функціонального призначення: пат. на кор. модель 135082 Україна: МПК А21D 13/80 (2017.01) / Цихановська І. В., Лазарева Т. А., Євлаш В. В., Александров О. В.; патентовласник УПА. № u201900894; заявл. 29.01.2019; опубл. 10.06.2019, Бюл. № 11. 4 с. *Внесок здобувача: здійснення патентного пошуку способу одержання заварних пряників, аналіз його недоліків, розробка формули винаходу та його опис.*

70. Склад сиркового десерту: пат. на кор. модель 135083 Україна: МПК А23С 19/06 (2006.01) / Цихановська І. В., Євлаш В. В., Александров О. В., Гонтар Т. Б., Кошева О. Ю.; патентовласник УПА. № u201900897; заявл. 29.01.2019; опубл. 10.06.2019, Бюл. № 11. 4 с. *Внесок здобувача: здійснення патентного пошуку рецептурного складу десерту з сиру кисломолочного, виявлення його недоліків, розробка формули винаходу та його опис.*

71. Спосіб виробництва сиркового десерту: пат. на кор. модель 135084

Україна: МПК (2019.01) A23C 19/076 (2006.01), A23C 23/00 / Цихановська І. В., Євлаш В. В., Александров О. В., Гонтар Т. Б., Кошева О. Ю.; патентовласник УПА. № u201900898; заявл. 29.01.2019; опубл. 10.06.2019, Бюл. № 11. 4 с. *Внесок здобувача: здійснення патентного пошуку способу одержання десерту з сиру кисломолочного, розробка формули винаходу та його опис.*

72. Спосіб виробництва плодово-ягідного самбуку функціонального призначення: пат. на кор. модель 135085 Україна: МПК (2019.01) A23L 21/00 / Цихановська І. В., Євлаш В. В., Александров О. В., Гонтар Т. Б.; патентовласник УПА. № u201900900; заявл. 29.01.2019; опубл. 10.06.2019, Бюл. № 11. 4 с. *Внесок здобувача: визначення недоліків існуючих способів виробництва плодово-ягідних самбуків, формулювання переваг розробленого способу, розробка формули винаходу та його опис.*

73. Спосіб виробництва формового желейного мармеладу функціонального призначення: пат. на кор. модель 135083 Україна: МПК A23L 29/20 (2016.01), A23L 21/10 (2016.01) / Цихановська І. В., Лазарева Т. А., Євлаш В. В., Александров О. В., Кайда Н. С.; патентовласник УПА. № u201900889; заявл. 29.01.2019; опубл. 10.07.2019, Бюл. № 13. 4 с. *Внесок здобувача: патентний пошук, розробка інноваційного способу виробництва формового желейного мармеладу, опрацювання формули винаходу та його опис.*

74. Спосіб виробництва зефіру функціонального призначення: пат. на кор. модель 135624 Україна: МПК A23L 21/10 (2016.01), A23L 29/10 (2016.01) / Цихановська І. В., Лазарева Т. А., Євлаш В. В., Александров О. В., Юрченко Л. І.; патентовласник УПА. № u201900891; заявл. 29.01.2019; опубл. 10.07.2019, Бюл. № 13. 4 с. *Внесок здобувача: патентний пошук технології виробництва зефіру біло-рожевого (на агарі і пектині), визначення його недоліків, розробка формули винаходу та його опис.*

75. Склад плодово-ягідного самбуку функціонального призначення:

пат. на кор. модель 135625 Україна: МПК А23L 21/10 (2016.01), А23J 1/08 (2006.01) / Цихановська І. В., Лазарева Т. А., Євлаш В. В., Александров О. В., Кайда Н. С.; патентовласник УПА. № u201900901; заявл. 29.01.2019; опубл. 10.07.2019, Бюл. № 13. 4 с. *Внесок здобувача: патентний пошук, визначення недоліків сучасних способів одержання плодово-ягідних самбуків, розробка формули винаходу та його опис.*

76. Тарасюк Н. Л., Барсова З. В., Цихановська І. В. Технологія отримання олійно-магнетитових суспензій // Хімічні Каразінські читання – 2012 (ХКЧ'12): тези ІХ Всеукр. наук. конф., 23–26 квітня 2012 року / Харківський національний ун-т ім. В. Н. Каразіна. Харків, 2012. С. 326–327. *Внесок здобувача: визначено технологічні параметри стадії пептизації.*

77. Денисова А. Ю., Цихановская И. В., Скородумова О. Б., Тарасюк Н. Л. Разработка устойчивой липидо-магнетитовой суспензии // Актуальні проблеми харчової промисловості та ресторанного господарства. Сучасні питання підготовки кадрів: матеріали І Всеукр. наук.-практ. конф., 12–13 квітня 2012 р. / Луганський національний ун-т ім. Тараса Шевченка. Луганськ, 2012. С. 155–160. *Внесок здобувача: визначено склад, технологічні параметри і режими виробництва ліпідо-магнетитових суспензій.*

78. Tajirov A., Cihanovskaja I. V., Barsova Z. V., Iluoykha N. G. Chemistry and technology of magnetite and barium-containing composite materials on its basis // International Conference on European Science and Technology: materials of II International research and practice conference, 9th – 10th May 2012 / Wiesbaden, 2012. S. 80–87. *Внесок здобувача: методами термогравіметрії, електронної мікроскопії та рентгенофазового аналізу досліджено структуру та дисперсність наночастинок Fe_3O_4 відразу після одержання та протягом зберігання (1,5 місяця).*

79. Цихановська І. В., Денисова А. Ю., Скородумова О. Б., Гончаренко Я. М. та ін. Дослідження впливу жирно-магнетитової суспензії на термін зберігання тваринних жирів / Прогресивні техніка та технології

харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфері торгівлі та послуг: тези Міжнар. наук.-практ. конф., 19 листопада 2013 р.: у 2 ч. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2013. С. 39. *Внесок здобувача: досліджено вплив наночастинок Fe_3O_4 у вигляді жирових суспензій на термін зберігання тваринних жирів.*

80. Цихановська І. В., Павлоцька Л. Ф., Денисова А. Ю., Скородумова О. Б. та ін. Дослідження стійкості комплексної харчової добавки спектро-фотометричним методом // *Les problemes contemporains de la technosphere et de la formation des cadres d'ingenieurs. Recueil des exposes des participants: materials of VII Internationale Scientifique Conference et methodique*, 08–17 octobre 2013. Donetsk, 2013. P. 180–184. *Внесок здобувача: розроблено методу спектрофотометричного визначення стабільності жирових суспензій із наночастинками Fe_3O_4 .*

81. Цихановська І., Сніжко А., Денисова А., Скородумова О. Розробка комплексної харчової добавки на основі стабілізованих ліпідом-магнетитових суспензій // *Львівські хімічні читання – 2013: тези XIV наук. конф., 26–29 травня 2013 р.* / Львівський національний ун-т ім. Івана Франка. Львів, 2013. С. 186. *Внесок здобувача: розроблено та обґрунтовано технологію виробництва харчової добавки на основі жиру-магнетитової суспензії для виробництва кондитерських виробів.*

82. Цихановська І. В., Чуракова В. М., Ілюха М. Г., Барсова З. В. Використання методу хімічної конденсації для синтезу частинок магнетиту – об'єктів нанотехнологій // *Хімічні Каразінські читання – 2014 (ХКЧ'14): тези VI Всеукр. наук. конф., 22–24 квітня 2014 р.* / Харківський національний ун-т імені В. Н. Каразіна. Харків, 2014. С. 293–294. *Внесок здобувача: розроблено та обґрунтовано технологію виробництва наночастинок харчової добавки на основі подвійного оксиду заліза (Fe_3O_4).*

83. Цихановська І. В., Бершадський Б. В., Барсова З. В.,

Александров О. В. та ін. Дослідження процесів окиснювальних та термічних перетворень в системі «оліє–ліпідо–магнетитова суспензія» // Хімічні Каразінські читання – 2015 (ХКЧ'15): тези VII Всеукр. конф. 20–22 квітня 2015 р. / Харківський національний ун-т імені В. Н. Каразіна. Харків, 2015. С. 117–118. *Внесок здобувача: визначено вплив наночастинок Fe_3O_4 на окисні процеси в жирах під час їх термообробки.*

84. Скородумова О. Б., Цихановская И. В., Денисова А. Ю. Изучение растворимости ультратонкого магнетита в отделах ЖКТ // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг: тези Міжнар. наук.-практ. конф., 18 жовтня 2012 р.: у 2 ч. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2012. С. 88–89. *Внесок здобувача: визначено обмежену розчинність наночастинок Fe_3O_4 в модельних середовищах ($pH=1,8...5,0$) та розраховано товщину активного приповерхневого шару.*

85. Цихановська І. В., Босенко В. О., Павлоцька Л. Ф., Коваленко В. О. та ін. Підвищення біологічної та харчової цінності кулінарних виробів // Інноваційні технології розвитку у сфері харчових виробництв готельно-ресторанного бізнесу, економіки та підприємництва: наукові пошуки молоді: тези Всеукр. наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів, 2 квітня 2015 р. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2015. Ч.1. С. 111. *Внесок здобувача: визначено перспективи використання наночастинок Fe_3O_4 у вигляді жирових суспензій у технологіях кулінарної продукції.*

86. Александров О. В., Цихановська І. В., Павлоцька Л. Ф., Цибань Л. С. Якість магнетито-ліпідних емульсій і перспективи їх використання // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: тези Міжнар. наук.-практ. конф., 19 травня 2016 р. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2016. С. 387–388. *Внесок здобувача: визначено перспективи використання магнетито-*

ліпідних емульсій у технологіях кулінарної продукції.

87. Цихановская И. В., Бершадский Б. Я., Барсова З. В. Оценка устойчивости липидо-магнетитовых суспензий на основе растительных масел // Хімічні Каразінські читання – 2016 (ХКЧ'16): тези VIII Всеукр. наук. конф., 18–20 квітня 2016 р. / Харківський національний ун-т імені В. Н. Каразіна. Харків, 2016. С. 134. *Внесок здобувача: визначено вплив наночастинок Fe_3O_4 на стійкість жирових суспензій із метою їх стабілізації.*

88. Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В., Скуріхіна Л. А. Вплив жиром-магнетитової суспензії на функціонально-технологічні показники яловичого фаршу // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. до 85-річчя Таврійського державного агротехнологічного університету та 50-річчя Харківського державного університету харчування та торгівлі, 5–7 вересня 2017 р. / ТДАТУ, ХДУХТ. Харків, Мелітополь, Кирилівка, 2017. С. 247–248. *Внесок здобувача: визначено вплив наночастинок Fe_3O_4 на функціонально-технологічні властивості фаршів із яловичини.*

89. Цихановська І. В., Александров О. В., Гонтар Т. Б., Євлаш В. В. та ін. Удосконалення технології виробництва житнього хліба, збагаченого харчовою добавкою комплексної дії // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. до 85-річчя Таврійського державного агротехнологічного університету та 50-річчя Харківського державного університету харчування та торгівлі, 5–7 вересня 2017 р. / ТДАТУ, ХДУХТ. Харків, Мелітополь, Кирилівка, 2017. С. 245–246. *Внесок здобувача: розроблено рецептурний склад житнього хліба з додаванням наночастинок Fe_3O_4 .*

90. Цихановская И. В., Александров А. В., Гонтар Т. Б., Павлоцкая Л. Ф. Исследование влияния биологически активной добавки на процессы окисления растительных масел // Переработка и управление

качеством сельскохозяйственной продукции: тезисы III Междунар. науч.-практ. конф., 23–24 марта 2017 г. / Белорусский государственный аграрный технический университет. Минск, 2017. С. 170–173. *Внесок здобувача: досліджено кислотне, йодне та пероксидне числа в системі «олія+НЧ Fe₃O₄».*

91. Цихановська І. В., Скуріхіна Л. А., Павлоцька Л. Ф. Дослідження впливу залізовмісної біологічно активної добавки на процеси перетравлюваності білків / Розвиток харчових виробництв ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: тези Міжнар. наук.-практ. конф., 18 травня 2017 р. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2017. С. 157–159. *Внесок здобувача: визначено перетравлюваність білків м'ясних посічених виробів під впливом наночастинок Fe₃O₄.*

92. Цихановська І. В., Александров О. В., Гонтар Т. Б., Павлоцька Л. Ф. Отримання та дослідження ліпідо-магнетитових суспензій // Розвиток харчових виробництв ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: тези Міжнар. наук.-практ. конф., 18 травня 2017 р. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2017. С. 332–333. *Внесок здобувача: розроблено та обґрунтовано технологію отримання ліпідо-магнетитових суспензій.*

93. Цихановська І. В., Александров О. В., Гонтар Т. Б., Павлоцька Л. Ф. Показники якості харчової добавки на основі магнетиту // Розвиток харчових виробництв ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: тези Міжнар. наук.-практ. конф., 18 травня 2017 р. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2017. С. 334–335. *Внесок здобувача: визначено показники якості харчової добавки на основі магнетиту.*

94. Цихановська І. В., Скуріхіна Л. А., Павлоцька Л. Ф., Димитрієвич Л. Р. Використання жиру-магнетитової суспензії для підвищення харчової цінності «Сухофрукти в шоколаді» // Технологии XXI. Прогрессивные

технологии в пищевой промышленности века: тезисы 23 междунар. науч.-практ. конф., 11–16 сентября 2017 г. / Сумська філія Харк. національного ун-т внутрішніх справ. Сумы, Одесса, Ч. 1. 2017. С. 51–52. *Внесок здобувача: визначено функціонально-технологічні властивості жиру-магнетитової суспензії для виробництва кондитерських виробів.*

95. Цихановська І. В., Блонська Д. С., Чернуха Я. І., Євлаш В. В. та ін. Вплив харчової добавки «Магнетофуд» на показники якості вівсяного печива // Інноваційні технології розвитку у сфері харчових виробництв, готельно-ресторанного бізнесу, економіки та підприємства: наукові пошуки молоді: тези Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, 19 квітня 2018 р. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2018. С. 71. *Внесок здобувача: визначено вплив харчової добавки «Магнетофуд» на показники якості вівсяного печива.*

96. Цихановська І. В., Юрченко Л. І., Приходько О.Ю. Технологія низькотемпературної обробки м'ясних напівфабрикатів на основі яловичого фаршу, модифікованого добавкою «Магнетофуд» // Холод в біології та медицині – 2018: тези 42 щорічної конф. молодих вчених, присвяченої 100-річчю з дня заснування Національної академії наук України, 23–24 травня 2018 р. / Національна академія наук України, Інститут проблем кріобіології і кріомедицини НАН України, кафедра UNESCO з кріобіології. Харків, 2018. С. 30. *Внесок здобувача: визначено вплив наночастинок харчової добавки «Магнетофуд» на зворотні процеси заморожування-разморожування у м'ясній сировині.*

97. Цихановська І. В., Євлаш В. В., Уразбаєва К. А. Формування технологічних властивостей желейних мас з використанням харчової добавки «Магнетофуд» // Підприємництво, торгівля: теоретичні підходи та практичні аспекти: матеріали I Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., 27–28 листопада 2018 р. / Полтавський ун-т екон. та торг. Полтава, 2018. С. 126–128. *Внесок здобувача: визначено вплив наночастинок харчової добавки «Магнетофуд»*

на структурно-механічні властивості гелеподібних мас.

98. Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В. Розробка технології житньо-пшеничного хліба «Харківський родничок» з додаванням поліфункціональної харчової добавки «Магнетофуд» // Інноваційні технології у хлібопекарському виробництві: матеріали Міжнар. спец. наук.-практ. конф. / Національний ун-т харч. технол. Київ, 2018. С.54–56. *Внесок здобувача: розроблено та обґрунтовано технологію виробництва житньо-пшеничного хліба «Харківський родничок» з ХД «Магнетофуд».*

99. Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В. Удосконалення технології вівсяного печива з додаванням харчової добавки «Магнетофуд» // Здобутки та перспективи розвитку кондитерської галузі: матеріали Міжнар. спец. наук.-практ. конф. / Національний ун-т харч. технол. Київ, 2018. С. 97–100. *Внесок здобувача: розроблено та обґрунтовано технологію виробництва вівсяного печива з ХД «Магнетофуд».*

100. Цихановська І. В., Александров О. В., Товма Л. Ф., Євлаш В. В. Сирний десерт, збагачений поліфункціональною харчовою добавкою «Магнетофуд» для покращення якості харчування військовослужбовців // Актуальні проблеми тилового забезпечення Національної гвардії України: тези Круглого столу Національної академії Національної гвардії України, 19 червня 2018 р. / Національна академія нац. гвардії України. Харків, 2018. С. 5–13. *Внесок здобувача: визначено вплив наночастинок харчової добавки «Магнетофуд» на структурно-механічні, мікробіологічні та органолептичні властивості десерту з сиру кисломолочного.*

101. Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В., Скуріхіна Л. А. Розробка технології біфштекса «Козацький» з додаванням поліфункціональної харчової добавки «Магнетофуд» // Технології харчових продуктів і комбікормів: тези Міжнар. наук.-практ. конф., 24–29 вересня 2018 р. / Одеська нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2018. С. 48–50. *Внесок здобувача: розроблено та обґрунтовано технологію біфштекса «Козацький»*

із додаванням ХД «Магнетофуд».

102. Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В. Розробка технології сирного десерту з додаванням поліфункціональної харчової добавки «Магнетофуд» // Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції: програма та тези VII-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 6–7 листопада 2018 р. / Національний ун-т харч. технол. Київ, 2018. С. 131–132. *Внесок здобувача: розроблено та обґрунтовано технологію сиркового десерту із додаванням ХД «Магнетофуд».*

103. Tsykhanovska I., Oleinik D., Alexandrov A. Substantiation of the mechanism of interaction between biopolymers of flour and the nanoparticles of the «Magnetofood» food additive // Book of Abstracts Conference of Young Scientists at East West Chemistry Conference, 10–11 October 2018 / Lviv Polytechnic National University. Lviv, 2018. P. 32–33. *Внесок здобувача: обґрунтовано механізм сольватації наночастинок ХД «Магнетофуд» диполями води.*

104. Цихановська І. В., Євлаш В. В. Використання наночастинок природних мінералів у харчових технологіях // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: тези Міжнар. наук.-практ. конф., 15 травня 2019 р. у 2 ч. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2019. С. 5–6. *Внесок здобувача: сформульовано основні тенденції розвитку сегмента структуроутворюючих харчових наноінгредієнтів природних мінералів в Україні.*

105. Цихановська І. В., Євлаш В. В., Круглова О. А., Євлаш Т. О. Економічна ефективність упровадження у виробництво інноваційної продукції // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: тези Міжнар. наук.-практ. конф., 15 травня 2019 р.: у 2 ч. / Харк. держ. ун-т харч. та торг.

Харків, 2019. С. 25–26. *Внесок здобувача: визначено економічну ефективність упровадження у виробництво інноваційної продукції з ХД «Магнетофуд».*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	46
ВСТУП	50
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ХАРЧОВОЇ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ НАНОЧАСТИНОК (аналітичний огляд літератури)	61
1.1 Загальна характеристика нанотехнологій та наноматеріалів	61
1.2 Технології виробництва частинок нанометрового діапазону для харчової продукції	70
1.2.1 Методи нанодиспергування компактного матеріалу	74
1.2.2 “Sol-gel”- технологія	75
1.2.3 Гідротермальний метод	77
1.2.4 Конденсація з газової фази	80
1.2.5 Виробництво у нанорозмірних реакторах	82
1.2.6 Хімічна конденсація наночастинок з розчинів у лужному середовищі з ефектом солубілізації	84
1.2.7 Методи отримання наноконпозиційних матеріалів та харчових добавок	86
1.3 Стан та перспективи впровадження нанотехнологій та наноматеріалів у технологіях харчової продукції з поліфазною структурою	91
1.4 Наноматеріали та нанодобавки мінерального походження (зокрема, оксиди металів) у технологіях харчової продукції	106
Висновки за розділом 1	116
РОЗДІЛ 2 ОРГАНІЗАЦІЯ, ОБ’ЄКТ, ПРЕДМЕТИ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	117
2.1 Методологічні підходи, програма теоретичних та експериментальних досліджень	117

	43
2.2 Об'єкт, предмети та матеріали дослідження	119
2.3 Методи та методики дослідження сировини, напівфабрикатів; оцінки якості та безпечності харчової продукції	123
2.4 Програмні засоби і комп'ютерні технології, статистична обробка отриманих даних, методи моделювання технологічних процесів та математичної обробки експериментальних даних	137
Висновки за розділом 2	137
РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНЕ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ НАНОЧАСТИНОК МІНЕРАЛЬНОГО ПОХОДЖЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЯХ ХАРЧОВОЇ ПРОДУКЦІЇ	139
3.1 Теоретичне обґрунтування потенціалу наночастинок мінерального походження (зокрема подвійного оксиду дво- та тривалентного заліза)	139
3.2 Наукове обґрунтування технології наночастинок оксидів заліза для харчової продукції	141
3.3 Експериментальне підтвердження технологічних параметрів виробництва наночастинок оксидів заліза (Fe_3O_4)	148
3.4 Дослідження фізико-хімічних показників ХДМ	157
3.5 Вивчення поверхневої активності ХДМ	165
3.6 Умови зберігання, показники якості та безпечності ХДМ	180
Висновки за розділом 3	183
РОЗДІЛ 4 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО- ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ХАРЧОВОЇ ДОБАВКИ «МАГНЕТОФУД» (ПОДВІЙНОГО ОКСИДУ ДВО- ТА ТРИВАЛЕНТНОГО ЗАЛІЗА)	185
4.1 Наукове обґрунтування взаємодії ХДМ з основними компонентами харчових систем – білками, жирами, полісахаридами, водою	185
4.2 Експериментальне підтвердження взаємодії ХДМ з білками, жирами, полісахаридами, водою	195

	44
4.3 Наукове обґрунтування та експериментальне підтвердження водоутримувальної здатності ХДМ	205
4.4 Вивчення впливу ХДМ на процеси окиснення в жирових системах	211
4.5 Наукове обґрунтування та експериментальне підтвердження жирозв'язування та жирутримання наночастинками ХДМ	214
4.6 Наукове обґрунтування та експериментальне підтвердження емульгувальної здатності ХДМ	220
4.7 Вивчення загущувальних, тиксотропних властивостей ХДМ та її впливу на геле- та піноутворення	225
4.8 Вивчення ремісійних (відображених) характеристик ХДМ	231
Висновки за розділом 4	234
РОЗДІЛ 5 ТЕХНОЛОГІЇ ХЛІБОБУЛОЧНОЇ, КОНДИТЕРСЬКОЇ, КУЛІНАРНОЇ, М'ЯСНОЇ ПРОДУКЦІЇ З ПОЛІФАЗНОЮ СТРУКТУРОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ ХАРЧОВОЇ ДОБАВКИ «МАГНЕТОФУД»	238
5.1 Наукове обґрунтування та експериментальне підтвердження раціонального способу введення ХДМ у харчову продукцію з поліфазною структурою	238
5.2 Технологія хлібобулочних виробів із суміші житнього та пшеничного борошна з використанням харчової добавки «Магнетофуд»	240
5.3 Технологія заварних пряників з використанням ХДМ	250
5.4 Технологія вівсяного печива з використанням ХДМ	257
5.5 Технологія м'ясних посічених виробів з використанням ХДМ	266
5.6 Технологія десерту «Слоненя» з сиру кисломолочного з використанням ХДМ	282
5.7 Технологія збитих десертів з використанням ХДМ	291
5.8 Технологія мармеладно-пастильних виробів із введенням ХДМ	299
5.8.1 Технологія мармеладу желейного формового з внесенням ХДМ	299
5.8.2 Технологія зефіру біло-рожевого з використанням ХДМ	310
Висновки за розділом 5	321

РОЗДІЛ 6 ДОКЛІНІЧНЕ ВИВЧЕННЯ ТОКСИКОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ХАРЧОВОЇ ДОБАВКИ «МАГНЕТОФУД»

6.1 Дослідження гострої токсичності харчової добавки «Магнетофуд»	324
6.2 Вивчення підгострої токсичності, цитотоксичності та фармакокінетичних характеристик харчової добавки «Магнетофуд»	328
6.3 Дослідження впливу харчової добавки «Магнетофуд» на гістоструктуру внутрішніх органів білих щурів за повторних введень	343
Висновки за розділом 6	354

РОЗДІЛ 7 КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА SWOT-АНАЛІЗ ХАРЧОВОЇ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ХАРЧОВОЇ ДОБАВКИ «МАГНЕТОФУД»

7.1 Оцінка ефективності та рентабельності інноваційної харчової продукції з використанням харчової добавки «Магнетофуд»	355
7.2. SWOT-аналіз інноваційної продукції з харчовою добавкою «Магнетофуд»	366
Висновки за розділом 7	377

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ДОДАТКИ (ТОМ 2)

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ANOVA RM – дисперсійний статистичний аналіз
- APCTOS2 – актуальні проблеми хімії та технології органічних речовин
- АлАТ – аланінамінотрансфераза
- АсАТ – аспартатамінотрансфераза
- БГАТУ – Білоруський державний аграрний технічний університет,
м.Мінськ
- БГКП – бактерії групи кишкових паличок
- БУКЭП – Белгородський університет кооперації, економіки і права
- ВАСГНІЛ – Всесоюзна академія сільськогосподарських наук ім. Леніна
- ВЕ пектин – високоетерифікований пектин
- ВЗЗ – водозв’язувальна здатність
- ВМ – відносна маса внутрішніх органів
- ВПЗ – водопоглинальна здатність
- ВС – водна суспензія
- ВУЗ – водо утримуюча (водуотримувальна) здатність
- ДБ – держбюджетна
- ДЗ “ЛНУ ім. Т. Шевченка” – Державний заклад Луганський національний університет ім. Тараса Шевченка
- ДНУ – Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
- ДНУ – Донецький національний університет імені Василя Стуса
- ДонНТУ – Донецький національний технічний університет
- ДТА – диференційно – термічний аналіз
- ДТГ – диференційно-термогравіметричний аналіз
- ДУ “Інститут проблем ендокринної патології ім В. Я. Данилевського” –
Державна установа “Інститут проблем ендокринної патології
ім В. Я. Данилевського”
- EDX – енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія
- ЕЗ – емульгуюча (емульгувальна) здатність
- ЕКГ – електрокардіограма
- ЕПР – електронний парамагний резонанс

ЖЕЗ – жироемульгуюча (жироемульгувальна) здатність
ЖЗЗ – жирозв’язувальна здатність
ЖС – жирова суспензія
ІМ – індикаторний метод
ІЧ-спектроскопічні – інфрачервона спектроскопія
ЙЧ або ІЧ – (йодне) або іодне число
КМ – коефіцієнт маси
КМАФАНМ – кількість мезофільних аеробних і факультативно анаеробних мікроорганізмів
КСС – кінетична седиментаційна стійкість
КУО – колонієутворювальні одиниці
КФК – колориметр фотоелектричний концентраційний
КЧ – кислотне число
ЛДГ – лактатдегідрогеназа
ЛНУ ім. Івана Франка – Львівський національний університет ім. Івана Франка
МНФ – монопуклеарні фагоцити
МОН – міністерство освіти і науки
НАНГУ – Національна академія Національної гвардії України, м. Харків
НДР – науково-дослідна робота
НЗ – набухаюча здатність
НУ “Львівська політехніка” – Національний університет “Львівська політехніка”
НУХТ – Національний університет харчових технологій, м. Київ
НЧ – наночастинки
НЧМ – наночастинки «Магнетофуд»
Од. ф. – одиниць фарінографа
ОНАХТ – Одеська національна академія харчових технологій
ПАР – поверхнево-активна речовина
ПЗ – піноутворююча (піноутворювальна) здатність
ПНЛФ “ФЕНІКС” – протипухлинний науково-лікувальний фітоцентр “ФЕНІКС”, м. Харків

Прилад ІДК – прилад індексу деформації клейковини
ПУЕТ– Полтавський університет економіки і торгівлі
ПХДПУ – Переяслав-Хмельницький Державний Педагогічний
Університет ім.Г.С.Сковороди
ПЧ – пероксидне число
Р, Т та R – вольтаж (висота) зубців
рН – водневий показник
С – концентрація, моль/дм³
СГАУ им. М. И.Вавилова – Саратовський державний аграрний
університет ім. М. І. Вавилова
СЕ – стійкість емульсій
СНГ – Співдружність Незалежних Держав
СП – піностійкість (або стабільність піни)
СР – суха речовина
ССС – серцево-судинна система
Т – термічний аналіз
ТГ – термогравіметричний аналіз
ТЕМ – трансмісійна (просвічуюча) електронна мікроскопія
УЗДА – ультразвуковий диспергатор
УПА – Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків
УНИИМИЖ УААН – Український науково-дослідний інститут кормів
Південного відділення ВАСГНІЛ на базі відділу кормовиробництва
Українського науково-дослідного інституту землеробства
ФН – фаховий напрям
ФТВ – функціонально-технологічні властивості
ФХП – фізико-хімічні показники
ХДМ – харчова добавка «Магнетофуд»
ХДУХТ – Харківський державний університет харчування та торгівлі
ХНУ– Харківський національний університет ім.. В.Н. Каразіна
ЦНС – центральна нервова система
ЧСС – частота серцевих скорочень
LD – летальна доза

NUFT – National University of Food Technologies, Kyiv

o/w – емульсія типу олія в воді

PQ – тривалість інтервалу серцевого циклу

QRS – тривалість шлуночкового комплексу

QT – тривалість інтервалу електричної систоли шлуночків

SWOT – аналіз сильних і слабких сторін інновації

S_{сед.} – константа седиментації

w/o – емульсія типу вода в олії

XRD – рентгенофазовий аналіз (рентгенівська дифракція)

Θ – крайовий кут змочування

ω – масова частка, % або долях одиниці

ВСТУП

Актуальність теми. Ринкові відносини, дефіцит вітчизняної сировини, значна частка імпортованих інгредієнтів із високою вартістю вимагають від виробників харчових продуктів інноваційних технологічних рішень, розроблення ресурсозберігаючих технологій, упровадження широкого асортименту конкурентоспроможної продукції з високими споживними властивостями та показниками безпеки.

Пріоритетним завданням для харчової промисловості сьогодні є створення харчових продуктів, властивості яких забезпечуються обґрунтованим вмістом та співвідношенням компонентів мінерального, тваринного і рослинного походження з використанням новітніх принципів харчової комбінаторики. Сучасні харчові продукти зазвичай мають полікомпонентний склад, є нестійкими гетерогенними системами. За цих умов складно виробнику гарантувати сталість технологічних процесів, а споживачу – одержувати якісну продукцію.

У зв'язку з цим виникає необхідність у дослідженні та розробці нових харчових добавок, які б дали змогу коригувати функціонально-технологічні властивості харчової сировини та продукції, зокрема водо- і жиророзв'язувальну, емульгувальну, водо- і жирутримуючу, піно- і гелеутворюючу здатність, стійкість емульсій і пін, розшарування та ін. Тому велику зацікавленість виробники та науковці як країни, так і світу виявляють до наноматеріалів, використання яких сприяє отриманню якісних та безпечних харчових продуктів.

Аналіз останніх наукових розробок та публікацій свідчить, що сьогодні основними напрямками досліджень у галузі харчових нанотехнологій є такі: розробка технологій виробництва наночастинок, нанониток, нанонутрієнтів, нанотранспортних систем і нанокапсульованих харчових речовин; розробка наноструктурованих харчових добавок, нанокомпозиційних матеріалів для харчових продуктів заданого складу з необхідними функціонально-

технологічними властивостями; розробка наносенсорів і нанодатчиків для контролю за якістю і безпечністю їжі та нових пакувальних матеріалів із використанням нанотехнологій, що забезпечують тривале зберігання і безпечність готового продукту.

Сьогодні у світі понад 400 компаній займаються дослідженнями в галузі використання нанотехнологій у виробництві харчової продукції й пакувальних матеріалів. На світовому ринку вже доступні понад 300 nanofood-продуктів. Однак відсутність комплексного підходу до використання наноматеріалів для виготовлення широкого асортименту харчових продуктів не дозволяє впровадити їх у масове виробництво.

Значний внесок у вирішення проблеми застосування нанотехнологій і наноматеріалів у виробництві харчової продукції був зроблений такими фахівцями, як: Р. Ю. Павлюк, В. В. Погарська, В. О. Тутельян, І. В. Гмошинський, І. М. Кобаса, В. М. Пасічний, С. А. Хотимченко, К. І. Попов, А. М. Филипов, А. В. Жердев, Д. В. Карпенко, Ю. І. Сидоренко, A. Ivask, M. R. Mozafari, M. A. Augustin, J. F. Graveland-Bikker, N. Garti та ін. Сучасні досягнення та досвід вітчизняних і зарубіжних фахівців у галузі нанотехнологій і наноматеріалів дозволяють застосувати їх деякі результати для створення концепції щодо використання мінеральних (неорганічних) нанодобавок, зокрема подвійного оксиду дво- та тривалентного феруму, зі стабільними фізико-хімічними показниками для коригування функціонально-технологічних властивостей харчової сировини і покращення споживних властивостей харчових продуктів.

Виходячи з викладеного вище, розробка науково обґрунтованих технологій харчових продуктів із використанням харчової нанодобавки мінерального походження на основі подвійного оксиду дво- і тривалентного феруму є актуальною науково-технічною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано в рамках науково-дослідної тематики кафедри харчових та хімічних технологій Української інженерно-педагогічної

академії, зокрема за темами №ФН-16-08 «Одержання та дослідження біологічно-активних добавок комплексної дії на основі ліпідомангнетофудових суспензій» (без цільового фінансування) і №11-01ДБ (0110U008507) «Створення теорії ресурсозберігаючого синтезу композиційних матеріалів на основі подвійних оксидів і розробка на її базі нових поліфункціональних матеріалів» (в межах держбюджетної НДР МОН України), а також кафедри хімії, мікробіології та гігієни харчування Харківського державного університету харчування та торгівлі за темами: №20-15-16Д (0115U004985) «Технології кондитерських виробів на фруктово-рослинній основі, збагачених залізом та йодом» та №24-15-17Д (0115U006672) «Технології дієтичних добавок із дефіцитними мікронутрієнтами та аналіз їх показників якості».

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є наукове обґрунтування та розроблення технологій харчової продукції зі поліфазною структурою з використанням функціонально-технологічного потенціалу наночастинок (НЧ) оксидів заліза, застосування яких дозволить інтенсифікувати технологічний процес виробництва, забезпечити покращення показників якості й подовжити термін зберігання готової продукції.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

– проаналізувати літературні джерела щодо використання нанодобавок у харчовій промисловості, зокрема наночастинок оксидів заліза; обґрунтувати і запропонувати наукову концепцію роботи;

– на підставі теоретичних досліджень науково обґрунтувати технологічні параметри виробництва харчової добавки мінерального походження та експериментально визначити параметри виробництва харчової добавки «Магнетофуд» (ХДМ);

– визначити фізико-хімічні показники, показники якості й безпечності харчової добавки «Магнетофуд»;

– установити закономірності взаємодії харчової добавки «Магнетофуд» із водою, білками, полісахаридами, жирами, вищими жирними кислотами;

визначити функціонально-технологічні властивості харчової добавки «Магнетофуд»;

– визначити поверхнево-активні властивості харчової добавки «Магнетофуд» (крайові кути змочування, поверхневий натяг, електрокінетичний ξ -потенціал); науково обґрунтувати та експериментально підтвердити жиरो- і водоутримуючу дію наночастинок ХДМ;

– обґрунтувати та експериментально підтвердити раціональний спосіб введення ХДМ у харчову продукцію емульсійного та емульсійно-суспензійного типу; розробити технології борошняних (хліб, пряники, печиво), м'ясних посічених (котлет, біфштексів з яловичини) виробів та десертів із сиру кисломолочного з використанням ХДМ; установити показники якості та безпечності готової продукції;

– дослідити та визначити функціонально-технологічні та структурно-механічні властивості м'ясних фаршів та сиркового десерту;

– установити раціональний спосіб введення ХДМ у харчову продукцію піно- та гелеподібного типу; розробити технології формового желейного мармеладу, зефіру біло-рожевого, збитих ягідно-фруктових десертів (мусу, самбуку) з використанням ХДМ; визначити показники якості та безпечності готових виробів;

– визначити структурно-механічні характеристики формового желейного мармеладу (на агарі й пектині) та умови його зберігання;

– визначити піноутворюючу здатність, піностійкість, структурно-механічні характеристики зефірних мас (на агарі й пектині), збитих ягідно-фруктових десертів (мусу і самбуку);

– провести доклінічні випробування ХДМ в умовах *in vivo* та *in vitro* на лабораторних тваринах;

– виконати комплекс організаційно-технологічних заходів з упровадження нових виробів із використанням ХДМ у практику підприємств харчової промисловості, закладів ресторанного господарства, освітній процес закладів вищої освіти;

– комплексно оцінити ефективність упровадження розроблених технологій шляхом визначення наукового, науково-технічного, соціально-економічного ефектів дослідження.

Об'єкт дослідження – технологія харчової добавки «Магнетофуд» та технології харчової продукції (житньо-пшеничного хлібу «Харківський родничок», заварних пряників «Харківські», вівсяного печива «Козак», сиркового десерту «Слоненя», котлет «Ситні», біфштексів з яловичини «Слобожанський», формового желейного мармеладу «Ранок» на агарі та «Веселка» на пектині, біло-рожевого зефіру «Весна» на агарі та «Літо» на пектині, ягідно-фруктових збитих десертів – мусу «Малинка» та самбуку «Ягідка»).

Предмети дослідження: наночастинки харчової добавки «Магнетофуд»; водяні розчини: концентратів яєчного білка, високоетерифікованого (ВЕ) пектину, агару, крохмалю, харчової добавки «Магнетофуд» (ХДМ) та їх суміші, хлоридної кислоти (HCl), натрію олеату; жири-магнетофудові суспензії на основі олій та жирів: олії соняшникової, кукурудзяної і соєвої, жиру свинячого, яловичого, кондитерського «Шортенінг» і «Віолія», саломасу; емульсії на основі соняшникової олії з ХДМ; модельні системи: «крохмаль+Магнетофуд», «житнє-пшеничне борошно (60:40)+Магнетофуд»; системи, що моделюють за своїм складом збивні маси: «яєчний білок+Магнетофуд», «яєчний білок+пектин (або агар)+Магнетофуд»; мармеладні та зефірні маси з ХДМ; харчові продукти: м'ясні посічені вироби, десерти з сиру кисломолочного, хліб житньо-пшеничний, пряники заварні, печиво вівсяне, мармелад желейний формовий, зефір біло-рожевий, ягідно-фруктові муси і самбуки.

Методи дослідження – теоретичні методи термодинаміки, стандартні та спеціальні методи визначення органолептичних, фізико-хімічних, функціонально-технологічних, структурно-механічних, мікробіологічних, медико-біологічних показників, експериментально-статистичні методи планування експерименту, аналізу систем та математичної обробки даних.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі теоретичних та експериментальних досліджень сформульовано та доведено наукову концепцію дослідження – включення до технології харчових продуктів із поліфазною структурою мінеральних ресурсів (зокрема оксидів заліза), як сировини для НЧ з функціонально-технологічним потенціалом, стабільними фізико-хімічними показниками і показниками безпеки дозволяє забезпечити показники якості й подовжити терміни зберігання харчової продукції. У межах реалізації наукової концепції шляхом узагальнення теоретичних та експериментальних досліджень:

уперше:

– встановлено закономірності утворення комплексів «наночастинка-високомолекулярна сполука (білок, полісахарид, жир)», які відбуваються через електростатичну взаємодію та координаційний (донорно-акцепторний) зв'язок. Аналізом цих взаємодій за допомогою «клатратних» моделей виявлено потенціал наночастинок для утворення цілого ряду комплексів за типами: «кластер», «клатрат», «кавітат», «комплекс-сендвіч»; ці моделі дозволили спрогнозувати забезпечення таких властивостей наночастинок, як амфіфільність і «кластерофільність», а введення НЧ до складу харчової продукції зі поліфазною структурою – технологічну стійкість гетерогенної структури шляхом Пікеринг або стеричної стабілізації;

– доведено, що здатність наночастинок ХДМ до поляризації, електростатичної координації і прояв цих властивостей в системах, які містять білки та полісахариди (вуглеводи), обумовлює водоутримуючу здатність ХДМ, закономірності якої описані фізико-хімічною моделлю «кластерно-петельно-ланцюгового» типу; урахувавши полярність наночастинок ХДМ та дипольний характер молекул H_2O , запропоновано «кластерно-капілярну» модель, яка призначена для обґрунтування функцій ХДМ у розчинах полісахаридів (вуглеводів); розроблено та доведено модель «двошарової координації» щодо механізму жирозв'язувальної та жирутримуючої здатності ХДМ за рахунок утворення координаційних та

ван-дер-ваальсових комплексів; розроблено моделі взаємодії наночастинок ХДМ з полярними та неполярними рідинами і молекулами; експериментально визначений ξ -потенціал – 34...44 мВ, що є теоретичною підставою для ствердження структуроутворюючої та стабілізуючої здатності ХДМ у харчових системах;

– встановлено закономірності, механізми та раціональні масові частки ХДМ, які в разі введення в технологічний процес виробництва харчової продукції попередньо переводяться в полідисперсний стан у вигляді жирових та водних суспензій; визначено функціонально-технологічні властивості (ФТВ) харчових продуктів із ХДМ та встановлено кореляцію між цими властивостями та механізмами гідратації, розчинення, утворення молекулярних шарів, кластерів та клатратів, що зумовлені поверхневою активністю наночастинок ХДМ.

набули подальшого розвитку та узагальнення:

– наукові концепції та їх обґрунтування щодо включення в технологічний процес виробництва харчових продуктів НЧ мінерального походження з регульованими фізико-хімічними показниками і показниками безпеки, що забезпечує підвищення якості та подовження терміну зберігання харчової продукції;

– теоретико-методологічні основи застосування наноматеріалів, що характеризуються комплексом функціонально-технологічних властивостей, у технологіях харчових продуктів, а саме ролі наночастинок ХДМ у формуванні функціонально-технологічних властивостей харчової продукції з поліфазною структурою;

– науково-практичні основи одержання наноструктурованих харчових виробів із гетерогенною дисперсною структурою.

Практичне значення одержаних результатів. На підставі реалізації наукової концепції, теоретичних та експериментальних досліджень впроваджено технології: ХДМ, хлібобулочної, кондитерської, кулінарної продукції з поліфазною структурою. Розроблено та затверджено технічні

умови (ТУ У 10.8-2023017824-001:2018. Додаток харчова на основі оксидів заліза “Магнетофуд”) та технологічну інструкцію з виробництва ХДМ; технологічні карти з виготовлення кулінарної продукції з введенням ХДМ.

Отримано висновок державної служби України з питань безпечності харчових продуктів та захисту споживачів про державну реєстрацію ХДМ як харчового продукту (№602-123-20-2/25702 від 12.06.2018 р.).

Реалізація роботи. За результатами дослідження здійснено впровадження наукових результатів у виробництво підприємств харчової промисловості: ТОВ НВП «Гемо-проект» (м. Харків, акти від 31.08.2018 р., 11.09.2018 р.), ТОВ «Чарівна мозаїка» (м. Харків, акти від 29.03.2018 р., 14.03.2019 р., 17.05.2019 р.) ФО-П «Ведерников» (м. Харків, акти від 17.01.2018 р., 14.02.2018 р., 22.03.2018р., 09.04.2018 р., 19.05.2018 р., 11.06.2018 р., 24.06.2018 р.); у продовольче забезпечення Національної академії Національної гвардії України (м. Харків, акт від 26.11.2018 р.). Результати роботи впроваджено в освітній процес кафедри харчових та хімічних технологій Української інженерно-педагогічної академії (акти від 17.10.2017 р., 13.11.2018 р., 14.02.2019 р.), кафедри технічного та тилового забезпечення Національної академії Національної гвардії України (акти від 16.01.2019 р., 21.02.2019 р., 14.03.2019 р., 03.04.2019 р., 11.04.2019 р., 15.05.2019 р., 12.06.2019 р.).

Проведено медико-біологічну апробацію ХДМ у Національному фармацевтичному університеті (м. Харків), яка підтвердила індиферентність добавки щодо гемостазу та функціонального стану печінки, нирок, серця і центральної нервової системи піддослідних тварин.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі стану проблеми, формулюванні наукової концепції роботи, її теоретичному та експериментальному підтвердженні, розробці та реалізації програми дослідження, аналізі та узагальненні результатів теоретичних та експериментальних досліджень, формулюванні висновків, підготовці матеріалів до публікації та складанні заявок на одержання патентів України

на корисні моделі, розробці нормативної та технологічної документації, упровадженні науково-технічних розробок у виробництво та освітній процес.

У матеріалах, опублікованих у співавторстві, дисертанту належать основні ідеї, наукове обґрунтування теоретичних положень, загальне керівництво та безпосереднє проведення експериментальних досліджень, аналіз та узагальнення одержаних результатів, формулювання висновків.

Апробація результатів дисертаційного дослідження. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та одержали позитивну оцінку науковців і фахівців галузі на конференціях, форумах, семінарах, основними з яких є: IV, VI–VIII Всеукраїнські наукові конференції студентів та аспірантів «Хімічні Каразінські читання» (м. Харків, 2012 р., 2014–2016 рр.); I Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми харчової промисловості та ресторанного господарства. Сучасні питання підготовки кадрів» (м. Луганськ, 2012 р.); II Міжнародна науково-практична конференція «European Science and Technology» (м. Вісбаден, 2012 р.); Міжнародні науково-практичні конференції «Прогресивна техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг» (м. Харків, 2012–2013 рр.); VII Міжнародна науково-методична конференція «Les problemes contemporains de la technosphere et de la formation des cadres d'ingenieurs. Recueil des exposes des participants» (м. Донецьк, 2013 р.); XIV Наукова конференція «Львівські хімічні читання» (м. Львів, 2013 р.); Всеукраїнські науково-практичні конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Інноваційні технології розвитку у сфері харчових виробництв, готельно-ресторанного бізнесу, економіки та підприємництва: наукові пошуки молоді» (м. Харків, 2015 р., 2018 р.); Міжнародні науково-практичні конференції «Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність» (м. Харків, 2016 р, 2017 р., 2019 р.); II Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні

аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності» (м. Харків, Мелітополь, Кирилівка, 2017 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции» (м. Мінськ, 2017 р.); 23 Міжнародна науково-практична конференція «Технологии XXI века. Секция: Прогрессивные технологии в пищевой промышленности» (м. Суми–Одеса, 2017 р.); 42 Щорічна конференція молодих вчених «Холод в біології та медицині – 2018 (м. Харків, 2018 р.); I Міжнародна науково-практична конференція «Підприємництво, торгівля: теоретичні підходи та практичні аспекти розвитку» (м. Старобільськ, 2018 р.); Міжнародна спеціалізована науково-практична конференція «Інноваційні технології у хлібопекарському виробництві та здобутки та перспективи розвитку кондитерської галузі» (м. Київ, 2018 р.); Круглий стіл «Актуальні проблеми тилового забезпечення Національної гвардії України» (м. Харків, 2018 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Технології харчових продуктів і комбікормів» (м. Одеса, 2018 р.); VII Міжнародна науково-технічна конференція «Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції» (м. Київ, 2018 р.); Конференція наукових співробітників «EastWest Chemistry» (м. Львів, 2018 р.).

Розроблена продукція була представлена на міжнародних виставках «Sweets Ukraine» та «Bakery Ukraine» (м. Київ, 11–13 вересня 2018 р.) та в виставці Освітнього проекту «Ніч науки» (м. Харків, 24.09.2016 р.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 105 наукових праць, у тому числі 3 монографії; 42 статті, із яких 32 – у наукових фахових виданнях України (з них 28 включено до міжнародних наукометричних баз даних, у тому числі 9 – Scopus, 4 – Web of Science), 7 – у періодичних виданнях інших держав із напрямку, із якого підготовлено дисертацію; 3 – в інших виданнях (у тому числі 1 – Scopus), що безпосередньо стосуються результатів дисертації; 30 патентів України на корисну модель; 30 тез доповідей та матеріалів конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційну роботу викладено у двох томах. Перший том складається з анотації, вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел, що включає 535 найменування, у тому числі 216 іноземних. Основний зміст дисертації викладено на 307 сторінках друкованого тексту, вона містить 80 таблиць, 113 рисунків. Другий том представлено 13 додатками на 658 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ХАРЧОВОЇ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ НАНОЧАСТИНОК (аналітичний огляд літератури)

У цьому розділі розглянуто перспективність запровадження нанотехнологій як основи підвищення ефективності технологічних процесів, висвітлено сучасний стан та перспективи впровадження наноінгредієнтів у харчовій промисловості, надано узагальнену інформацію щодо способів виробництва та реалізації функціонально-технологічних потенціалів наночастинок мінерального походження, зокрема феритових, у харчових продуктах з поліфазною структурою.

1.1. Загальна характеристика нанотехнологій та наноматеріалів

У світі останнім часом спостерігається інтенсивне поширення нанотехнологій, спрямованих на ефективне використання наноматеріалів із заданими властивостями, що знаходять застосування в різних галузях індустрії та народного господарства [1–11].

У 1959 р. американський фізик Р. Feynman висловив думку, що незабаром будуть виготовлятися наноматеріали, тобто матеріали на атомарному або молекулярному рівні, з небаченими досі властивостями [12]. Через 15 років професор Токійського наукового університету N. Tangichi вперше використав термін “нанотехнологія”, маючи на увазі, що ця технологія включає процес оброблення поділу, побудови та зміни матеріалів шляхом впливу на них одним атомом або однією молекулою. Важливим імпульсом до розвитку нанотехнологій стало створення у 1981 р. сканувального тунельного

мікроскопа, що дозволило одержувати зображення різних поверхонь з розрізненням на атомному рівні [12].

Це послужило підґрунтям для створення перших наноматеріалів з роздільною здатністю, багато з яких невдовзі знайшли найширше застосування [1, 2, 13], що дозволило, по-перше, значно покращити різноманіття існуючих продуктів, по-друге – створити принципово нові композиційні матеріали із істотно поліпшеними фізико-хімічними характеристиками та функціонально-технологічними властивостями [14–16].

У прийнятій Європейським Союзом “Стратегії розвитку до 2020 року” *нанотехнології* віднесені до числа “ключових проривних технологій”, покликаних забезпечити раціональне, стійке і загальне зростання індустрії, у тому числі харчової [17]. Уперше чітко концепція наноматеріалів була сформульована Г. Глейтером, який увів у науковий обіг і сам термін. Головний акцент був зроблений на вирішальній ролі численних поверхонь розділу в наноматеріалах як основі для істотної зміни властивостей матеріалів, зокрема харчової сировини, харчових систем та готових виробів [18, 19].

Відповідно до прийнятої в 2001 в США “Національної нанотехнологічної ініціативи” нанотехнології – це технології спрямованого маніпулювання матеріальними об’єктами, що мають молекулярні розміри в межах (1...100) нм, коли унікальні явища створюють можливості для незвичайного застосування [20]. Тому нанотехнологію ще називають системою управління речовиною на атомарно-молекулярному рівні. Наноматеріали виявляють принципово нові корисні властивості, які відсутні у речовин, представлених суцільними фазами або макроскопічними дисперсіями. Одна з основних причин появи таких властивостей – збільшення площі поверхні, що призводить до багаторазового посилення процесів, зумовлених поверхневими (міжфазними) взаємодіями. Результатом стає характерне для наноматеріалів значне посилення взаємодій з іншими речовинами та матеріалами [1–7], що призводить до розширення асортименту продукції з необхідними функціонально-технологічними властивостями і показниками якості та безпеки [13–16].

Таким чином, термін “нанотехнологія” розуміють як сукупність методів і прийомів, які забезпечують створення і модифікацію об’єктів, що містять компоненти нанорозмірного діапазону (1...100) нм і мають цілковито нові якості, які дозволяють поліпшувати експлуатаційні та/або споживчі характеристики і властивості одержаних продуктів. Характерно, що для опису нанооб’єктів класичні закони фізики стають неприйнятними, адже доводиться мати справу з квантовими фізичними явищами, які на сьогодні залишаються недостатньо вивченими [13, 16].

Останнім часом на тлі піднесення нанотехнологій відбувається розвиток нанобіотехнології — галузі, що використовує наномасштабні явища і процеси, які породжують нові шляхи розвитку біології, фізики, хімії та медицини [21, 22]. Застосування нанотехнологій та наноматеріалів у тваринництві вже дозволяє розв’язати ряд гострих проблем і забезпечує значний ефект щодо формування мікроклімату в приміщеннях для тварин і птиці, контролю концентрації шкідливих речовин у повітрі, приготуванні кормів, дезинфекції тваринницьких приміщень, лікуванні маститу тварин, знезараженні і пастеризації яєць і яйцепродуктів, очищенні стічних вод тощо [22]. Зрозуміло, що всі перелічені інноваційні аспекти безпосередньо стосуються поліпшення якості і безпечності харчових продуктів [12].

Розрізняють нанотехнології двох типів залежно від того, за яким принципом відбувається створення кінцевого продукту, — “зверху-вниз” (topdown-approach) або “знизу-вверх” (bottom-up approach). Технологія “зверху-вниз” заснована на зменшенні розмірів тіл механічним або іншим обробленням, аж до отримання об’єктів нанометрового розміру [12]. До таких технологій, наприклад, належать модифікація поверхні макрооб’єктів (напилення, обсіпання) для поліпшення їхніх функціонально-технологічних властивостей (зокрема, бактеріостатичність; антиоксидантна, стабілізувальна дія та ін.) та отримання нанопорошків різних речовин. Технологія “знизу-вверх” зводиться до виготовлення нанорозмірного об’єкта шляхом складання з окремих атомів і молекул. Прикладами таких технологій є створення нових композитних

матеріалів і макрооб'єктів (наприклад, структурованих супрамолекулярних ансамблів харчових систем) з покращеними властивостями з використанням добавок наномасштабу [12].

Тобто об'єктами нанотехнології можуть бути як безпосередньо нанорозмірні матеріали (наночастинки, нанопорошки, нанокапсули, нановолокна, наноплівки), так і макроскопічні об'єкти, структура яких контролювано створюється і модифікується наночастинками. А загалом системи вважаються виготовленими з використанням нанотехнологій, коли як мінімум один з їх компонентів є об'єктом нанотехнологій, іншими словами, якщо існує хоча б одна стадія технологічного процесу.

Структури нанометрового діапазону можна виявити практично в будь-якому матеріальному об'єкті. Наприклад, більшість харчових продуктів містить частинки природного походження, розміри яких вписуються в наномасштабі. Зазвичай вони розглядаються як об'єкти класичної колоїдної хімії. Наприклад, багато протеїнів являють собою сферичні глобули розміром (1...10) нм. Більшість полісахаридів і ліпідів – це лінійні структури, товщина яких становить менше декількох нанометрів. Функціональні властивості багатьох сировинних матеріалів, а також успішна переробка харчових продуктів обумовлені наявністю, модифікацією і виникненням самоформування наноструктур. Це волокна целюлози в стінках рослинних клітин; кристалічні структури в крохмалі; волокнисті структури, що регулюють плавлення, формування і текстуру желатину; міцели, що утворюються на межі олії і води і відповідають за стабільність харчових емульсій. Але це ще не свідчить про застосування нанотехнологій, головною ознакою яких є можливість керування процесами перетворення речовини на рівні молекул під час створення об'єкта (зокрема, харчової системи) з новими, заздалегідь заданими фізико-хімічними, функціонально-технологічними та структурно-механічними властивостями. Адже нанотехнологію можна визначити ще як процес перетворення, виготовлення і застосування сировини й наноматеріалів за допомогою коригування розмірів і форми наноматеріалів.

Європейське патентне відомство *харчову нанотехнологію* визначає як “сукупність прийомів і способів, що забезпечують отримання та самозбирання біологічних молекул або біомолекулярних кластерів з розмірами близько 100 нм хоча б в одному вимірі макроструктури, придатних для створення продуктів харчування, які мають поліпшені або принципово нові функціонально-технологічні властивості” [10, 20].

Наноматеріали, згідно з визначенням Єврокомісії (2004), – це не один “універсальний” матеріал, а великий клас різних матеріалів, що поєднує їхні сімейства з практично привабливими властивостями [23]. Сьогодні існує близько десятка класифікацій способів і методів отримання наноматеріалів за різними фізичними і хімічними принципами [24–26]. Загалом наноматеріали можна умовно поділити на три великі категорії: природні (наприклад, малі частинки, що утворюються у процесах ґрунтової і вулканічної активності); антропогенні ненавмисного походження (наявні у промислових та транспортних викидах); сконструйовані (вироблені).

За формою і хімічним складом виділяють такі основні види наноматеріалів [24, 26]:

- вуглецеві наночастинки (фулерени, графен, вуглецеві нанопени);
- наночастинки простих речовин (не вуглецю);
- наночастинки бінарних сполук;
- наночастинки складних речовин.

За кількістю вимірів наноматеріали поділяються на:

- нульмерні (сфероїдні наночастинки, квантові точки);
- одномірні (нанотрубки квантові, провідники);
- двовимірні (тонкі плівки, поверхні розділів);
- тривимірні (нанокластери, багат шарові структури з нанорозмірними дислокаціями).

Таким чином, до наноматеріалів пропонується відносити як самі наночастинки, які зазвичай складаються з одного або декількох молекулярних елементів карбону, заліза, кварцу, титану, оксидів металів, полімерів тощо, так і

матеріали, що містять ці наночастинки. У свою чергу, наноматеріали складаються виключно з наночастинок, а композитні наноматеріали — з наночастинок, нанотрубок, нановолокон і “buckyballs” [12]. Різниця між ними в тому, що наночастинки виробляють за особливими нанотехнологіями із стандартних матеріалів, а нанотрубки, нановолокна і “buckyballs” – це спеціально створені частинки зі специфічними кристалічними решітками, в яких молекули розташовані за типом “соломка” [12, 18, 27]. Нанодисперсні системи складаються з рідкого дисперсійного середовища з рівномірно розподіленими в ньому наночастинками. Нині нанодисперсії застосовуються, наприклад, у фармації, косметології, харчовій промисловості [1, 2, 15]. Плівки, або шари, називають гетероструктурами. Найтонша плівка складається з одного атомного шару речовини, нанесеного на тверду або рідку поверхню. Такі плівки називають плівками Ленгмюра-Блоджетт [24, 28].

Наночастинка – ізольований твердофазний об’єкт, який має чітко виражену границю з навколишнім середовищем, розміри якого в усіх трьох вимірах становлять від 1 до 100 нм [24]. Виділяють два основних типи наночастинок: *нанокластери* (нанокристали) – частинки впорядкованої будови розміром (1...5) нм, що містять до 1000 атомів; власне *наночастинки* – частинки розміром (5...100) нм, що складаються з (103...108) атомів [26, 28, 29].

Всі наночастинки характеризуються декількома основними рисами, що ставлять їх поза конкуренцією порівняно з іншими речовинами, що знаходять практичне використання в діяльності людини. У наночастинках дії поверхневих сил піддається весь об’єм і всі атоми розглядаються як поверхневі; мають велику питому поверхню, значно прискорюючи взаємодію між ними і середовищем, у яке вони поміщені (як приклад можна навести розкладання води на водень і кисень в присутності наночастинок діоксиду титану); унікальні тим, що в них речовина знаходиться в особливому стані, при якому проявляються квантово-механічні ефекти, що формують комплекс специфічних фізико-хімічних і функціонально-технологічних властивостей [30].

Невеликі розміри та “унікальні” властивості наночастинок надають матеріалам фізико-хімічні характеристики, що значно відрізняються від показників їхніх макроаналогів. Залежність хімічної активності від розміру реагуючих частинок пояснюють тим, що властивості індивідуальних атомів елементів, які формуються з атомів кластерів і наночастинок, відрізняються від властивостей компактної, об’ємної речовини [31].

Незвичайні фізичні, хімічні, біохімічні, функціонально-технологічні характеристики наночастинок пов’язані з проявою так званих “квантових розмірних ефектів” [32, 33]. Ці ефекти викликані фізико-хімічними властивостями, зумовленими поведінкою електронів, а саме: зменшується розмір при переході від макроскопічного тіла до масштабів декількох сотень або декількох тисяч атомів; різко змінюється щільність станів електронів у валентній зоні і в зоні провідності. У першу чергу “квантові розмірні ефекти” позначаються на магнітних, електричних і хімічних властивостях. “Безперервна” щільність станів, що була в макрооб’єктах, замінюється в нанооб’єктах на дискретні рівні з відстанями між ними, залежними від розмірів частинок [33]. Тому наночастинки перестають демонструвати фізико-хімічні, біохімічні та інші властивості, що притаманні макростану речовини, або проявляють їх у зміненому вигляді. Наночастинки виділяють в окрему, проміжну область, і називають “штучними атомами”. Це пов’язано з розмірно залежною поведінкою властивостей наночастинок і нетиповістю порівняно з властивостями атомів, з одного боку, і макроскопічних тіл – з іншого [33].

Іншим головним чинником, який впливає на фізичні і хімічні властивості наночастинок, є зростання в них відносної частки “поверхневих” атомів, що знаходяться в інших умовах (координаційне число, симетрія локального оточення і т. п.), ніж атоми об’ємної фази. За рахунок цього відбувається серйозна зміна властивостей “поверхневих” атомів, у результаті чого також змінюється характер взаємодії між атомами, що знаходяться на поверхні, і атомами всередині частинки, що може приводити до кардинальної зміни фізико-хімічних властивостей. Наприклад, теоретично і

експериментально доведено, що в “кластерних утвореннях” ферромагнетиків повністю зникає магнетизм поверхневих атомів при покритті карбонільними лігандами, у той час як магнітна поведінка атомів всередині “кластера” залишається незмінною [32, 33]. Унікальні фізико-хімічні властивості наночастинок інтенсивно досліджуються і визначаються багатьма чинниками: хімічним складом; типом кристалічної решітки та ступінем дефектності; розміром і формою частинок; морфологію частинок, особливо для частинок з комплексною структурою; взаємодією частинок з навколишньою матрицею і сусідніми частинками. Змінюючи розміри, форму, склад і будову наночастинок, можна в певних межах управляти фізико-хімічними та функціонально-технологічними характеристиками наноматеріалів [2, 32–35].

Наявність цих неоднорідностей не дозволяє вважати наночастинок в буквальному сенсі однорідними, тому що властивості поверхневих і внутрішніх областей різняться. З енергетичної точки зору зменшення розмірів частинки приводить до зростання частки поверхневої енергії в хімічному потенціалі, що робить її здатною ефективно взаємодіяти з будь-якими хімічними сполуками. Глибина взаємодії з навколишнім середовищем (зокрема, біополімерами: білками, ліпідами, вуглеводами) визначається двома основними чинниками: поверхневою енергією і природою хімічної речовини наночастинок [32, 33].

Число відомих наноматеріалів, їх кількість та галузь використання постійно розширюються. Сьогодні у світі зареєстровано і випускається промисловістю понад 2000 найменувань наноматеріалів [12]. Деякі з них вже досить давно ввійшли в побут. Наприклад, наночастинок діоксиду титану ($\text{TiO}_2\text{-NPs}$), які використовуються у косметичних засобах, включаючи креми для засмаги [36], наносрібло (Ag-NPs), що використовують з метою знищення мікроорганізмів у контейнерах для зберігання їжі, в освіжувачах повітря, у взуттєвих устілках і пральних машинах [37, 38].

В таблиці 1.1. розглянемо фізико-хімічні особливості поведінки речовин в нанорозмірному стані і їх вплив на фізико-хімічні показники наноматеріалів [30].

**Фізико-хімічні особливості поведінки наночастинок
та їх фізико-хімічні показники**

Фізико-хімічні особливості поведінки речовин в нанорозмірному стані	Зміни фізико-хімічних показників наноматеріалів
Збільшення хімічного потенціалу речовин на міжфазній межі великої кривизни	Зміна топології зв'язку атомів на поверхні приводить до зміни їх хімічних потенціалів, зміни розчинності, реакційної і каталітичної здатності наночастинок і їх компонентів
Висока питома поверхня наноматеріалів (в розрахунку на одиницю маси)	Збільшення адсорбційної ємності, хімічної реакційної здатності може призводити до взаємодії з біологічними структурами (ліпідами, білками, полісахаридами)
Невеликі розміри і велике відношення поверхні до об'єму, отже, мають високу поверхневу енергією	Можливе утворення колоїдних розчинів, високі сорбційні властивості, взаємодія з біополімерними матрицями (білками, полісахаридами, жирами)
Висока адсорбційна активність	Можлива адсорбція на наночастинках різних речовин. Багато наноматеріалів, що мають гідрофобні властивості або є електрично зарядженими, що підсилює процеси адсорбції на них різних адсорбатів

Наноматеріали сьогодні знаходять все більш активне застосування в харчовій промисловості (очищення питної води, фільтрація рідких продуктів, пакувальні матеріали, збагачення продуктів мікронутрієнтами, створення нанобіосенсорів, безпека і якість продуктів харчування, засоби доставки біологічно активних компонентів, нові матеріали для детектування патогенів і захист навколишнього середовища і т.д.) [2, 34, 35, 38, 39]. Наприклад, використання наноліпосомів у технології сиру шляхом інкапсуляції ензимів, джерелом яких є мікроорганізми *Lactococcus /actis*, за допомогою молочних жирів. Це дозволило значно поглибити смакові якості сиру за рахунок збільшення концентрації речовин, які формують смакові якості – диацетилу та ацетоїну у 8 разів при обробці сиру за температури (30...33) °C [40].

Передбачається, що використання нанотехнологій сприятиме подальшому підвищенню якості та безпечності харчових продуктів [41].

Отже, сконструйовані наноматеріали розроблено з метою надання їм особливих властивостей, нехарактерних для їхніх макропередників, унаслідок чого істотно посилюється функціонально-технологічний потенціал та технологічні можливості. А це можна використовувати і вже близько (15–20) років використовують в різних напрямках життєдіяльності людини, зокрема адресної доставки ліків, очищення навколишнього середовища, поліпшення смакових і живильних властивостей їжі та багато чого іншого, що в минулому здавалось недосяжним [34, 40, 42, 43].

1.2 Технології виробництва частинок нанометрового діапазону для харчової продукції

Виходячи з *наукової концепції роботи* проаналізуємо можливі варіанти технологій виробництва наночастинок з метою регулювання функціонально-технологічних властивостей у технологіях харчової продукції.

Припустимо необхідною вимогою повинно бути:

- відсутність токсичності;
- невбудовування в метаболізм;
- гелеутворювальні, стабілізувальні, сорбційні, колоїдні, загущувальні, тиксотропні, бактеріостатичні, антиоксидантні властивості;
- емульгувальна, водо- та жирозв'язувальна, водо- та жирутримувальна, піно- та гелеутворювальна, кольороформувальна здатність.

Промислове виробництво високодисперсного порошку Fe_3O_4 в Україні є досить налагодженим та багатотонажним [44, 45], але воно спрямоване на одержання Fe_3O_4 для технічного застосування з мінімальним розміром частинок (1...2) мкм. Більш дрібні частинки Fe_3O_4 одержують подрібненням або методом конденсації – термічної, електролітичної, вакуумної, хімічної та ін. [46–49].

З інформаційних джерел відомі основні технології виробництва наночастинок [44–53] (рис. 1.1.). Кожна технологія має свої переваги і недоліки, і її вибір залежить, у першу чергу, від мети застосування отриманих наночастинок. Таким чином, основні технології виробництва неорганічних наночастинок і наноструктур такі: фізичні: (механічне диспергування, випаровування-конденсація, ударно-хвильові (детонаційні), електровибух, лазерна абляція; фізико-хімічні: фото- і радіаційно-хімічні, сонохімічні, плазмохімічні, механохімічні, кріохімічні; хімічні: хімічне відновлення, реакції в двофазних системах, розкладання і піроліз; біологічні.

Фізичні методи засновані на протіканні фізичних процесів, які, як правило, не супроводжуються одночасним протіканням хімічних реакцій.

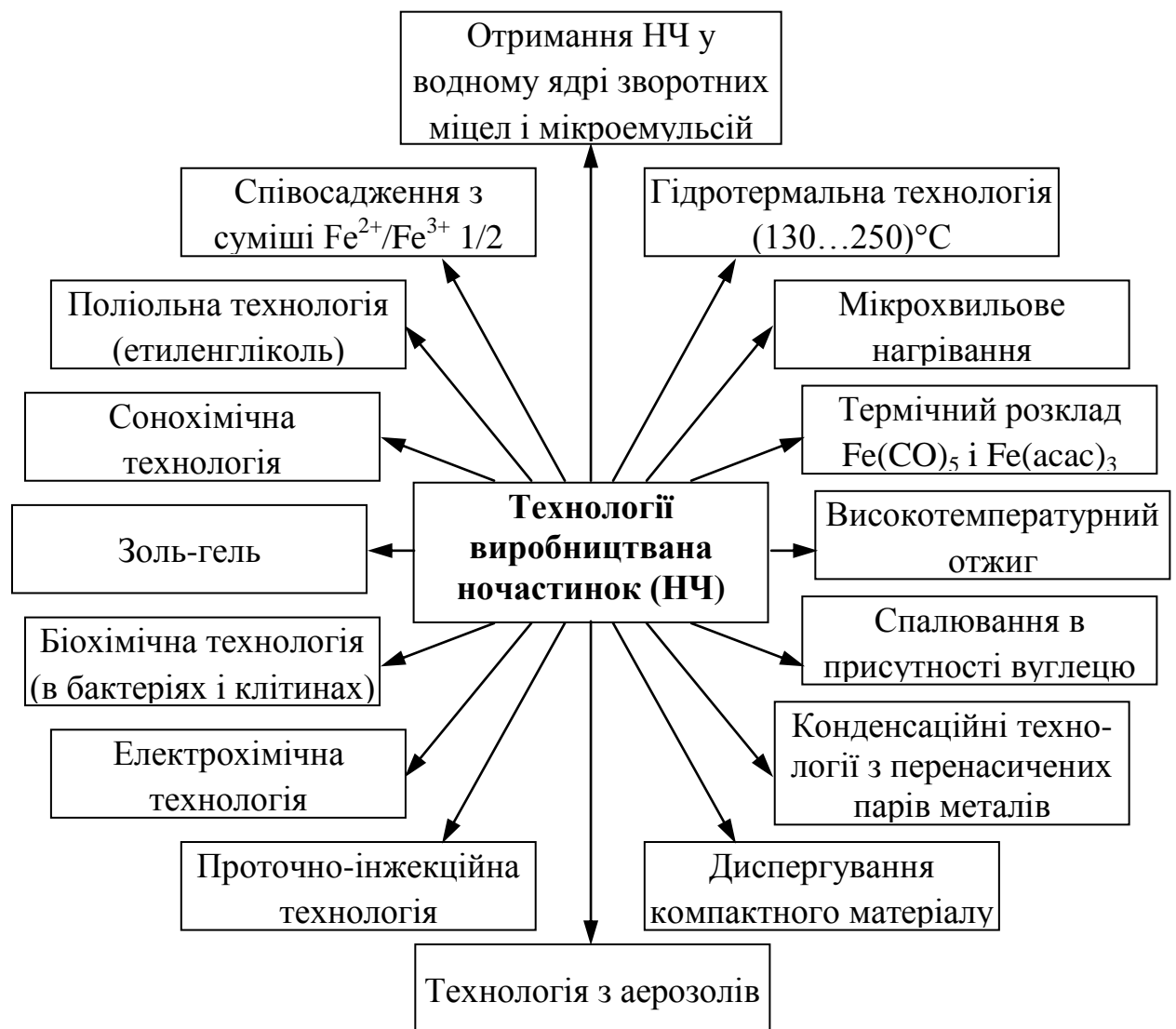


Рис. 1.1. Основні технології виробництва наночастинок

Основною перевагою фізичних методів синтезу наночастинок є часта відсутність протікання хімічних процесів, що забезпечує отримання частинок з того матеріалу, з якого вони зроблені, тобто в складі готового продукту будуть відсутні сторонні хімічні речовини [46, 47].

Не менш поширеними є фізико-хімічні методи синтезу наночастинок і наноструктур. Їхньою особливістю є одночасне протікання фізичних і хімічних процесів, унаслідок чого може бути отриманий продукт з новим хімічним складом [47, 48].

Одними з найстаріших і перевірених методів синтезу наноматеріалів є хімічні методи. Особливістю цих методів є те, що утворення наноструктур відбувається завдяки протіканню різних хімічних реакцій. Відмінною особливістю від фізичних та фізико-хімічних методів синтезу є наявність у складі готового продукту великої кількості речовин: стабілізаторів, компонентів реакційної суміші, побічних продуктів. Як наслідок, для отримання “чистих” наночастинок необхідно проводити додаткове очищення суміші [46–49].

Біосинтез наночастинок може відбуватися і в різних мікроорганізмах. Дослідниками [50, 51] було виявлено, що синтез колоїдних частинок срібла може здійснюватися бактеріями *Pseudomonas stutzeri* AG259. Для здійснення синтезу в живильне середовище додаються іони срібла (зазвичай у вигляді нітрату срібла), а сам синтез відбувається в периплазматичному просторі бактеріальної клітини. Також для синтезу наночастинок можуть використовуватися дріжджові клітини [52]. Зростання наночастинок у такому випадку відбувається на поверхні клітини. У результаті роботи [53] було виявлено, що міцеліальні гриби виду *Fusarium oxysporum* здатні до позаклітинного синтезу наночастинок за допомогою ферменту нітратредуктази. У цілому мікробіологічний синтез наночастинок є вельми перспективним, тому що для його здійснення не потрібні спеціальні відновники і стабілізатори, а використовуються лише поживні середовища для зростання мікроорганізмів. Ще однією серйозною перевагою такого синтезу є можливість отримання

комбінованих антибіотичних препаратів, що містять одночасно і традиційний для того чи іншого штаму бактерицидний або фунгіцидний агент, і наночастинки, також володіють бактерицидними і фунгіцидними властивостями. Основними недоліками подібних синтезів є складність контролю розмірів одержуваних наночастинок, складність виділення отриманих частинок з культуральної рідини і відділення їх від біомаси, а також неможливість зміни стабілізуючих агентів [51–53].

Оскільки Fe_3O_4 належить до феритів, то більш детально розглянемо методи отримання феритових наноматеріалів. Серед списку феритових матеріалів у природі трапляється магнетит (мінерал складу Fe_3O_4) у вигляді дрібних зерен як акцесорний мінерал у всіх типах гірських порід. Частіше спостерігається у вигляді зернистих або зливних мас. Досить стійкий до атмосферної дії, накопичується в річкових і прибережно-морських розсипах, утворюючи родовища типу “чорних пісків” [44].

Промислові родовища магнетиту пов’язані з магматичними породами. До найбільших родовищ природного магнетиту відносять: в Україні – Криворізький басейн; у Росії – Курська магнітна аномалія, Оленегірське родовище, Кольський півострів, Костомукшське родовище, Карелія; родовища Канади, Бразилії, Венесуели, району Верхнього озера у США [44]. Природний магнетит завжди має катіонні домішки, з яких найчастіше трапляється Ti , Al , Mg та Mn .

Зазвичай у промисловості ферити одержують традиційним керамічним методом: проведення твердофазної реакції феритизації між оксидом відповідного металу MeO та оксидом феруму (III) Fe_2O_3 при температурах 900–1200°C, дрібні частинки фериту одержують подрібненням у кулькових млинах [46].

Промислове виробництво феритів є досить налагодженим та багатотонажним, але воно спрямоване на одержання феритів для технічного застосування: мінімальний розмір частинок становить (8...10) мкм, до того ж як технічні матеріали мають небажані домішки та можуть бути контаміновані

мікроорганізмами. Суттєвий прогрес, особливо протягом останнього десятиріччя, був досягнутий у синтезі частинок нанометрового діапазону. Розроблені до теперішнього часу методи одержання наночастинок вельми різноманітні. У літературі наведено близько десятка класифікації цих методів за різними фізичними та хімічними принципами [18, 47, 48, 54, 55].

Найбільш поширеними серед наявних методів отримання наночастинок феритів є метод диспергування компактного матеріалу, золь-гель метод, гідротермальний, методи конденсації з газової фази, синтез у нанореакторах, метод хімічної конденсації з водних розчинів у лужному середовищі.

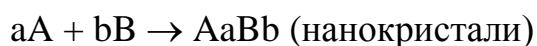
1.2.1. Методи нанодиспергування компактного матеріалу

Метод механохімічного диспергування компактного матеріалу в млинах різної конструкції як спосіб отримання дисперсних систем є досить відомим і продовжує залишатися досить поширеним.

Для диспергування використовують шарові, вібраційні, планетарні та інші конструкції млинів. При сумісному диспергуванні порошків можливе утворення механічних сплавів (ефект механохімічного сплавлення компонентів, що змішуються у рівноважних умовах). Численні дослідження встановлюють [32, 56, 57], що розмір частинок у такому методі залежить від температурного режиму і часу диспергування (від декількох годин до декількох діб).

Механічна дія призводить до появи пружних напружень в кристалі. Змінюючи інтенсивність і характер механічної дії, можна контролювати властивості матеріалів, що отримують унаслідок механічної активації. У цьому разі механічну активацію кристалів супроводжує процес руйнування макрокристалів та подрібнення частинок речовини.

Процес заснований на механічній активації твердофазних реакцій, що протікають при диспергуванні. Важливо, що механічна енергія цього процесу провокує хімічну взаємодію, таке поєднання двох процесів поширено під назвою «механохімічний метод синтезу». Схематично процес має вигляд:



Прикладом механохімічного синтезу складних оксидів з простих може служити отримання наночастинок феритів різних двовалентних катіонів. Однак отримані механосинтезом наночастинок при нагріванні швидко переходять у стабільні великі кристали фериту.

Так, у роботах [54, 58–60] метод використовується для отримання феритів нікелю, магнію, цинку шпінельної структури. Зазначається суттєва залежність властивостей отриманих феритів, їх структурних та розмірних параметрів від температурного режиму синтезу та часу подрібнення. Недоліком цього методу є забруднення кінцевого продукту матеріалом шарів або інших пристроїв, які використовують як подрібнювальні елементи. Існує межа механічного одрібнення твердих тіл, що перешкоджає у ряді випадків отриманню нанорозмірних частинок з вузькою дисперсією. Для диспергування металів і сплавів можна використовувати також електроерозію. У цьому випадку процес диспергування протікає всередині діелектричної рідини, продукти перетворення якої покривають поверхню наночастинок, що утворюються.

Залежно від умов проведення процесу, природи металу і середовища диспергування діаметр одержуваних наночастинок може знаходитися в інтервалі (2,5...20,0) нм, але окремі частинки при цьому можуть мати розміри 100 нм, що підтверджується при аналізі розміру синтезованих частинок [56, 61].

Таким чином, метод диспергування характеризується як доволі простий метод, що не потребує дорогого обладнання, дозволяє отримувати частинки нанометрового діапазону (однак з дисперсією, яка важко контролюється).

1.2.2. “Sol-gel”- технологія

Це метод отримання наночастинок, що використовує як вихідні колоїдні розчини солей відповідних металів [62–64]. Метод заснований на переході від колоїдного розчину (золю) до колоїдного осаду (гелю). Перехід може бути організований різними способами і може призводити до утворення міцелярних

або полімерних гелів. У першому випадку умови осадження визначаються наявністю в розчині електролітів, які нейтралізують подвійний електричний шар на поверхні міцел, або просторовими чинниками, пов'язаними з асоціацією і злипанням частинок (обидва процеси ускладнюють міцелоутворення). У другому випадку визначальними параметрами є глибина і швидкість протікання хімічних реакцій, що регулюють ріст і розгалуженість полімерного ланцюга.

У полімерних системах гель побудований з довголанцюгових молекул, які утворюють щільні сітки. Міцелярні гелі складаються з окремих колоїдних частинок, що утворюють за рахунок водневих зв'язків або електростатичної взаємодії розгалужені ланцюги. Міцелярні розчини, як правило, готують гідролізом розчинів неорганічних солей у присутності основ з подальшою пептизацією осаду гідроксиду, що утворюється.

У разі отримання складного оксиду проводять сумісне осадження гідроксидів декількох металів [65]. На гідроліз впливає ряд чинників: природа алкільної групи, природа розчинника, концентрація алкоголятів у розчині, температура, присутність кислот й основ, що каталізують процес.

Для перетворення отриманого гелю в оксидний матеріал проводять ще декілька етапів обробки: “старіння”, формування, висушування, термообробку. Важливо, що залежно від того, як проводяться ці процеси, можна отримати наноматеріал у вигляді порошку, волокон, плівок і брикетів. Зазначеною технологією з цинкового фериту були отримані нанотрубки [66] діаметром 100 нм та товщиною стінок 18 нм, з високими значеннями магнітних параметрів.

У колоїдному розчині часто можна більш вільно змінювати співвідношення компонентів. Крім того, колоїдні системи складаються з дуже дрібних часток (10...100) Å, які при висушуванні по-різному розподіляються в просторі. Таким чином можна отримати найрізноманітніші за властивостями матеріал.

Альтернативою методу термічного розкладання органічних солей ферума є “золь-гель” метод отримання наночастинок Fe_3O_4 , який полягає в первісному осадженні ферума з розчину прекурсору у вигляді золю гідроксиду ферума.

Наступні етапи конденсації і неорганічної полімеризації ведуть до утворення тривимірної структури, а відпалювання утвореного гелю дозволяє отримати нанорозмірні частинки Fe_3O_4 . Так, в роботі [67] “золь-гель” методом були отримані наночастинки Fe_3O_4 розміром (9...17) нм при температурах віджигу (200...400) °С відповідно.

Таким чином, “золь-гель” метод є багатостадійним та багатофакторним, а отже, складним за відтворюваністю. Дозволяє отримувати нанопорошки як простих, так і складних оксидів з розміром декілька нанометрів. Більше підходить для отримання плівок, волокон нанометрової товщини та високопористих твердих речовин.

1.2.3. Гідротермальний метод

В останні роки для отримання нанокристалічних оксидних матеріалів все більш широке застосування знаходить гідротермальний метод, який дозволяє керувати морфологією дисперсного продукту за рахунок варіювання параметрів проведення процесу (температури, концентрації розчину, тривалості процесу і т.д.) [68–74].

Сутність методу полягає в нагріванні солей, оксидів або гідроксидів металів у вигляді розчину або суспензії при підвищеній температурі (до 573 К) і тиску (близько 100 МПа). При цьому в системі відбуваються хімічні реакції, що приводять до утворення продукту реакції – простого або складного оксиду. Гідротермальне отримання наночастинок проводять у автоклавах, футерованих тефлоном з об’ємом $(50...300) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Тривалість обробки складає від $10 \cdot 60^{-1} \text{ с}$ до $24 \cdot 60^{-1} \text{ с}$. Високий тиск збільшує температуру кипіння, тому процес можна проводити при більш високій температурі, ніж у водних розчинах при атмосферному тиску. Зі збільшенням температури збільшується розчинність речовин, осадження продукту реакції відбувається повільніше, кристали продукту виходять більш дрібними, ніж при осадженні у звичайних умовах [68–71].

Гідротермальний процес проводять у двох режимах. Для отримання оксидних порошків методом високотемпературного гідролізу використовують водні розчини відповідних нітритів з $\text{pH}=(0,1\dots2,0)$ од.. При гідротермальній обробці гелів гідроксидів їх осадження проводять з розчинів відповідних нітратів з додаванням розчину аміаку (натрій гідроксиду) при інтенсивному перемішуванні до значень $\text{pH}=(6,0\dots12,0)$ од.. Після перебігу реакції в автоклаві реакційну суміш охолоджують до кімнатної температури. Продукт гідротермального виробництва відділяють від маточного розчину фільтруванням на скляному фільтрі та з використанням центрифугування. Після багаторазової промивки кінцевий продукт висушують при температурі $(353\dots373)$ К [69, 71].

У літературі описана методика гідротермального отримання багатьох простих і складних оксидів. Для виробництва в гідротермальних умовах нанокристалічних порошків феритів цинку ZnFe_2O_4 , фериту нікелю NiFe_2O_4 і нікель-цинкових феритів складу $\text{Ni}_{0,2}\text{Zn}_{0,8}\text{Fe}_2\text{O}_4$ і $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ була використана методика, заснована на попередньому співосадженні амоній гідроксидом відповідних аморфних гідроксидів (при оптимальній, попередньо встановленій величині $\text{pH} = 8,0$ од.) з подальшою гідротермальною обробкою гелю. За цією методикою були отримані нанокристалічні ($d=10\dots20$ нм) зразки нікель-цинкових феритів складу $\text{Zn}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0; 0,5; 0,8; 1,0$) [72–74].

Нині набув поширення метод отримання *нанорозмірних частинок Fe_3O_4* розкладанням термічно нестабільних прекурсорів, таких як ацетилацетонат, купферронат, карбоніл ферума або солі вищих карбонових кислот [75]. При використанні методу термічного розкладання форма і розмір часток залежить від температури, при якій відбувається їх утворення, а також від швидкості нагріву реакційної суміші. Високі температури дозволяють досягти високого ступеня кристалічності частинок, що виникають. Наприклад, у роботі [76] проводили термічний розклад $\text{Fe}(\text{асас})_3$, розчиненого у феніловому ефірі, що містить 1,2-гексадекандіол й олеїнову кислоту як стабілізатори. Унаслідок виробництва з реакційної суміші були виділені монодисперсні частинки Fe_3O_4 розміром 4 нм. Як

відновник можна використовувати різні висококиплячі розчинники, такі як дифеніловий, бензиловий, діокліловий ефіри, октадецен й інші [77, 78].

У деяких випадках відновником виступає олеїламін. Тоді, варіюючи співвідношення розчинника і відновника, наприклад, олеїламіна і бензилового ефіру, можна контролювати дисперсність одержуваного порошку Fe_3O_4 [79]. Також, змінюючи співвідношення олеїнової кислоти й олеїламіна, можливо отримання частинок Fe_3O_4 різної форми. Так, переважання в реакційній суміші олеїнової кислоти приводить до утворення сферичних наночастинок, а недолік – до частинок кубічної форми. Була продемонстрована можливість використання як прекурсора свіжоосадженого гідроксида $\text{Fe}(\text{OH})_3$, отриманого при взаємодії FeCl_3 і NaOH [80]. Гідроксид ферума вводили в розчин 1-октадецена, що містить олеїнову кислоту, і нагрівали до 320°C в атмосфері аргону, після чого з реакційної суміші були виділені частинки Fe_3O_4 діаметром 10 нм, яким притаманні високий ступінь кристалічності.

Поверхні наночастинок Fe_3O_4 , отриманих відповідно до описаної вище методики, притаманний гідрофобний характер за рахунок використання як стабілізаторів жирних органічних кислот, спиртів тощо. Методи отримання гідрофільних наночастинок Fe_3O_4 припускають дещо інші підходи при здійсненні синтезу. Досить проста процедура отримання воднодиспергованих частинок Fe_3O_4 була описана в роботі [81]. Як прекурсор ферума автори використовували як $\text{Fe}(\text{асас})_3$, так і $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, а як розчинник – 2-піролідон. Шляхом зміни часу нагрівання вдалося отримати частинки із середніми розмірами 4, 12 і 60 нм (1, 10 і 24 год відповідно), що робить цей метод перспективним з точки зору отримання частинок заданого розміру. Як розчинник для отримання гідрофільних частинок Fe_3O_4 також можна використовувати тетраетіленгліколь [82], бензиловий спирт [83] та ін..

Перспективним варіантом гідротермального методу отримання наночастинок Fe_3O_4 є реакція розкладання органічного похідного у водному середовищі в автоклаві при тиску понад 100 атм і температурі понад 200°C [84]. Однак при використанні такого способу отримання спостерігається залежність

характеристик кінцевого продукту від таких чинників як тип розчинника, значення температури і час проведення синтезу. Наприклад, розмір одержуваних наночастинок Fe_3O_4 збільшується разом зі збільшенням часу реакції і зменшенням концентрації прекурсору.

Розкладання нестабільних прекурсорів ферума може відбуватися і в умовах впливу ультразвуку. При схлопуванні кавітаційних бульбашок, що виникають при ультразвуковому опроміненні розчинника, відбувається сильний локальний розігрів, який викликає розкладання прекурсора з утворенням Fe_3O_4 . Так, стабільна суспензія аморфних частинок Fe_3O_4 може бути отримана сонолізом $\text{Fe}(\text{CO})_5$ в присутності додецилсульфату натрію як стабілізатора [85].

Таким чином, гідротермальний метод виробництва наночастинок отримав широкий розвиток в останнє десятиліття завдяки порівняльній простоті, дешевизні (з устаткування необхідний тільки автоклав) і можливості отримання практично монодисперсних нанопорошків з розміром частинок в одиниці нанометрів.

1.2.4. Конденсація з газової фази

Для переводу речовини у стан пари використовують різні способи нагрівання: термічне, лазерне, плазмове, із застосуванням полум'я. Методи конденсації з газової фази широко використовуються не тільки для отримання нанопорошків, а й для отримання наноплівки, нанотрубок та інших порожнистих фігур різної форми [86–88].

Серед методів *хімічної конденсації з газової фази* виділяють *плазмохімічний метод*, метод гідролізу в полум'ї, метод імпульсного лазерного випаровування. При хімічній конденсації відбувається розкладання пари речовини з утворенням твердого продукту, хімічний склад якого відрізняється від складу пари.

Усі відомі плазмохімічні способи одержання нанопорошків можуть бути об'єднані у три методи за агрегатним станом вихідної сировини, що вводиться у

плазму: переробка газоподібних сполук, переробка крапельно-рідкої сировини, переробка твердих частинок, зважених у потоці плазми. До недоліків методу можна віднести: високу корозійну активність летких сполук; високу адсорбційну здатність наночастинок (унаслідок якої на їх поверхні адсорбуються вихідні газоподібні речовини); необхідність застосування дорогого обладнання (плазмотрону).

При *фізичній конденсації* склад вихідної пари та твердої речовини – продукту виробництва є однаковим. Фізичні методи можна характеризувати як *диспергаційно-конденсаційні*, оскільки першою стадією є диспергування вихідної речовини до атомарного розміру, а потім її конденсація.

Серед методів фізичної конденсації з газової фази виділяють метод молекулярних пучків, аерозольний метод, метод кріоконденсації, електровибух металевих дротів.

Індивідуальні магнітні наночастинок вперше були одержані методом молекулярних пучків [86, 87]. У цьому випадку випаровування металу проводять у вакуумі в камері з діафрагмою. Частинок, що випаровуються, проходячи через діафрагму, утворюють молекулярний пучок.

У Міжнародному центрі електронно-променевої технології Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона під керівництвом Б.О. Мовчана здійснюється синтез наночастинок шляхом електронно-променевого випаровування у вакуумі. При цьому макроскопічний об'єкт-попередник (металевий злиток) атомізується шляхом нагрівання потужним електронним променем. У подальшому створений паровий потік конденсує на підкладці з утворенням наночастинок. Шляхом варіації температури підкладки можна регулювати середній розмір отриманих наночастинок [88, 89].

В основі методу синтезу наночастинок з пересиченої пари металів лежить класична теорія нуклеації, у якій кластери нової фази, що зароджуються, описують моделлю сферичної рідкої краплі. Для отримання наночастинок (кластерів) використовують різні способи випаровування металу: лазерне випаровування, термічне випаровування, дуговий розряд, випаровування в

плазмі, випаровування під дією сонячної енергії. У кожному методі використовуються різні варіанти устаткування, що відрізняються технічними рішеннями тих або інших вузлів. Всі перераховані вище методи випаровування металу дозволяють вивчати як фізико-хімічні характеристики наночастинок в газовій фазі (до осадження пари металу на підкладку), так і властивості порошків або плівок, одержаних у результаті осадження.

Отримання наночастинок розпилюванням пари металу – достатньо добре розроблений метод як у практичному, так і в теоретичному аспектах. Цей метод при термічному або лазерному випаровуванні дозволяє синтезувати грами порошків, що складаються з наночастинок. Цим способом можна диспергувати метали, сплави, оксиди, проте вартість одержаних таким шляхом наноматеріалів залишається все ще достатньо високою.

Останнім часом для синтезу наночастинок стали використовувати кріогенний метод [90, 91]. У такому разі конденсація атомів металів і їхніх сполук відбувається при низьких температурах у кріогенній матриці, найчастіше – в середовищі рідкого інертного газу. Такий метод дозволяє одержувати хімічно дуже чисті наночастинок, однорідні за складом і будовою, що не мають пустот та інших морфологічних неоднорідностей.

1.2.5. Виробництво у нанорозмірних реакторах

В останні роки інтенсивно розвивається і широко використовується метод синтезу наночастинок у нанорозмірних реакторах [92–96]. До таких нанореакторів належать, зокрема, міцели [92–94]. Зворотні міцели є найдрібнішими краплями води, стабілізованими в гідрофобній рідкій фазі за рахунок утворення моношару поверхнево-активної речовини на їх поверхні. Завдяки строгому дозуванню кількості міцелостабілізуючої речовини в кожній міцелі (оскільки утворення наночастинок відбувається без підведення додаткової речовини ззовні) можна не тільки регулювати склад і середні

розміри частинок, але й одержувати монодисперсні зразки з достатньо вузьким розподілом частинок за розмірами.

Слід зауважити, що при спробі отримання частинок складного фериту $\text{Ni}_{0.2}\text{Zn}_{0.44}\text{Fe}_{2.36}\text{O}_4$, рентгенофазовим аналізом було встановлено [95, 96], що значна частина катіонів цинку не ввійшла до структури синтезованого зразка. Це суттєво знизило магнітні параметри частинок, при отриманні частинок задовільного розміру (7 нм).

Останнім часом набув поширення метод отримання наночастинок Fe_3O_4 співосадженням солей феруму в мікроемульсіях. Мікроемульсії Fe_3O_4 представляють собою термодинамічно стабільні колоїдні розчини, які утворені двома рідинами, що не змішуються, за рахунок стабілізації їх межі розділу тонким шаром поверхнево-активних молекул (ПАР).

Мікроемульсії можуть бути прямими і зворотними, що визначається їх будовою. У так званих зворотних емульсіях краплі води розподілені у фазі неполярного розчинника. Розмір крапель може змінюватися залежно від співвідношення вода / неполярний розчинник / ПАР, за рахунок чого вони можуть виступати як мікрореактори регульованого розміру при отриманні наночастинок методом співосадження [97]. Для утворення подібних систем використовують різні види катіонних, аніонних і неіоногенних ПАР, такі як додецилсульфонат натрію (SDS) [98], біс(2-етилгексилсульфосукцінат) натрію (AOT) [99], цетилтриметиламоній бромід (СТАВ) [100], поліоксиетилен-10-октилфеніловий ефір [98].

Варто зазначити, що використання неіоногенних ПАР є кращим, тому що адсорбція заряджених молекул на поверхні наночастинок, що утворюються, може перешкоджати утворенню правильної кристалічної решітки. Використання мікроемульсій дозволяє краще контролювати розмір одержуваних наночастинок і збільшувати їх монодисперсність. Так, наприклад, шляхом зміни співвідношення компонентів реакційної суміші в роботі [101] дослідники змогли отримати монодисперсні наночастинок з розмірами 3, 5, 7 і 9 нм. Власні властивості ПАР також можуть впливати на процес утворення

наночастинок. Було показано, що використання ПАР з різними значеннями гідрофільно-ліпофільного балансу (ГЛБ) веде до отримання частинок різного розміру [98]: ПАР з великими значеннями ГЛБ формують міцели меншого розміру, унаслідок чого наночастинки, що утворюються в них шляхом співосадження, виходять менше.

1.2.6. Хімічна конденсація наночастинок з розчинів у лужному середовищі з ефектом солубілізації

Найбільш поширеним методом отримання наночастинок оксидних магнетиків є синтез за методом копреципітації (співосадження) солей відповідних катіонів металів у лужному середовищі [102–105].

Детальне дослідження механізму модельних реакцій, які лежать в основі формування феритів, вказує на складний характер цього процесу. Для реальних систем перебіг процесу формування фериту через твердофазні взаємодії оксидів, тобто за керамічною технологією, значною мірою залежить від дифузійних обмежень, тому в останні десятиліття для одержання оксидних порошків широко застосовуються методи “микрої” або “м’якої” хімії, пов’язані з використанням розчинів та аморфних співосаджених і зневоднених гідроксидів. Крім того, співосажені гідроксиди можуть бути вихідними матеріалами при одержанні різноманітних сорбентів, каталізаторів та барвників.

На сьогодні відомі поодинокі роботи [102, 103, 105], автори яких вивчають механізм утворення феритів із співосаджених гідроксидів. Повна заміна іонів Fe^{2+} структури магнетиту іншими двовалентними іонами при синтезі феритів методом хімічної конденсації приводить до уповільнення старіння осаду та необхідності його прожарювання для завершення процесу феритизації (формування певної кристалічної решітки та магнітних властивостей).

У роботі [105] було детально розглянуто можливості методу хімічної

конденсації для одержання високодисперсних частинок феритів повністю заміщеного магнетиту. Експериментальними дослідженнями було встановлено хімізм процесів, які становлять механізм реакцій при синтезі частинок, обрано оптимальну температуру для завершення процесу феритоутворення. Встановлено, що одержання частинок повністю заміщеного магнетиту з катіонами Cu^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Ba^{2+} може бути проведено у дві стадії: співосадження вихідних речовин у лужному середовищі та високотемпературна феритизація продуктів співосадження.

Метод хімічної конденсації має ряд переваг. За умов змішування та осадження компонентів у рідкій фазі досягається висока дисперсність та тісний контакт, забезпечується рівномірний розподіл складових компонентів феритових частинок. Як наслідок, продукти синтезу характеризуються відтворюваністю хімічного складу та властивостей. Метод дозволяє одержувати частинки наномаштабного діапазону, що відповідає їхньому суперпарамагнітному стану. Синтез методом хімічної конденсації передбачає процес магнітної сепарації продуктів синтезу в розчині. За цих умов супутні продукти реакції (враховуючи їх парамагнітні властивості) повністю евакуюються з реакційної суміші. Синтезовані частинки феритів мають мінімум домішок, що є важливим для застосування їх у фармації та медицині. До того ж цей метод є доволі доступним, простим та дешевим, не потребує складного і дорогого хімічного обладнання.

Враховуючи стрімкі темпи розвитку нанотехнологій у фармації, медицині, косметології, харчовій промисловості, визначення умов синтезу феритових наночастинок різного складу для харчових технологій має актуальне практичне значення. З цією метою вважаємо за доцільне продовжити проведення комплексних досліджень можливостей методу хімічної конденсації як методу синтезу оксидних наночастинок мінерального походження різного складу та структурного типу.

1.2.7. Методи отримання наноконпозиційних матеріалів та харчових добавок

Під час розроблення способів одержання наноконпозиційних матеріалів необхідно враховувати високу поверхневу енергію і малий розмір наноконпонентів [106]. Конпозиційні матеріали діляться (рис. 1.2) на:



Рис. 1.2. Класифікація наноконпозиційних наноматеріалів

матеріали, що містять наноконпоненти в основній масі; шаруваті (ламіновані) наноматеріали; матеріали, що містять наноконпоненти на проміжних структурах; матеріали, що містять наноконпоненти на поверхні [107, 108].

Матеріали, що містять наноконпоненти в основній масі, можна отримати змішуванням вихідних компонентів в розчині (або розплаві) [106, 109] або методом крейзингу [110] і просочуванням пористих матеріалів колоїдними розчинами наночастинок. Наноконпоненти при цьому знаходяться в іммобілізованому вигляді в об'ємі полімерної матриці або порах, які пронизують весь матеріал.

Введення наноконпонентів в полімерну структуру таким методом дозволяє отримати матеріали зі зниженими газо- і паропроникністю, а також поліпшеними механічними характеристиками.

Матеріали, що містять наноконпоненти на проміжних структурах, є гібридними наноструктурами, у формі “щітки”, на волосках якої закріплені цільові наноконпоненти [109]. Істотним недоліком отримання таких матеріалів є висока складність виготовлення.

Шаруваті (багатошарові) матеріали являють собою матеріали, верхній шар яких містить наноконпонент. Перевагою таких матеріалів є можливість контролювати міграцію наноконпонентів з полімерного матеріалу при контакті з харчовою продукцією.

Матеріали, що містять наноконпонент на поверхні, отримують методом нанесення наноконпонента на поверхню полімерного матеріалу (розпиленням, плазмовим напиленням) з подальшим його закріпленням.

Останнім часом набули поширення методи *модифікування поверхні наночастинок*. Модифікація поверхні наночастинок у сучасних дослідженнях виконується з метою надання їм специфічної функціональності. Використання поверхневих речовин змінює розчинність наночастинок, забезпечує приєднання різних органічних сполук (білків, полісахаридів, жирів), підсилює поверхневу активність та гігроскопічність [111–115].

Застосовують різноманітні мономерні (карбоксилати, фосфати), неорганічні (кремнезем, золото, срібло, гадоліній) та полімерні (декстран, ПЕГ, полівініловий спирт тощо) покриття. Так, застосування в м'ясній промисловості наномодифікованих латексних покриттів для захисту ковбасних виробів може змінювати мікробіологічний статус продукції й істотно пролонгувати терміни її зберігання [116].

Так, гідрофільність або гідрофобність наночастинок оксидів металів зазвичай є високою. Тому для зміни ступеня гідратації поверхні наночастинок застосовуються різні підходи, які поділяються на “in-situ” і “ex-situ”:

– “in-situ” модифікація здійснюється взаємодією наночастинок з різними видами поверхнево-активних речовин (ПАР), включаючи аніоногенні, катіоногенні, неіоногенні і цвіттер-іонні за рахунок Ван-дер-Ваальсових взаємодій [117–119];

– “ex-situ” модифікація заснована на утворенні ковалентного зв’язку поверхневих груп наночастинок з полімерами [120–122] або кремнійорганічними сполуками [123, 124, 125–131], такими як гексаметилдисилазан, триметилхлорсилан, диметилдихлорсилан, диметилсилоксан.

Наприклад, мікросфери частинок магнетиту (Fe_3O_4) із шаром сіліцій (IV) оксиду (SiO_2) на поверхні одержують з використанням методів “золь-гель” технології або синтезу в мікроемульсії (нанореакторах) [114, 133–135]. Останній метод використовує міцели (зворотні міцели) для обмеження та контролю покриття кремнезему на поверхні частинок магнетиту (рис. 1.3).

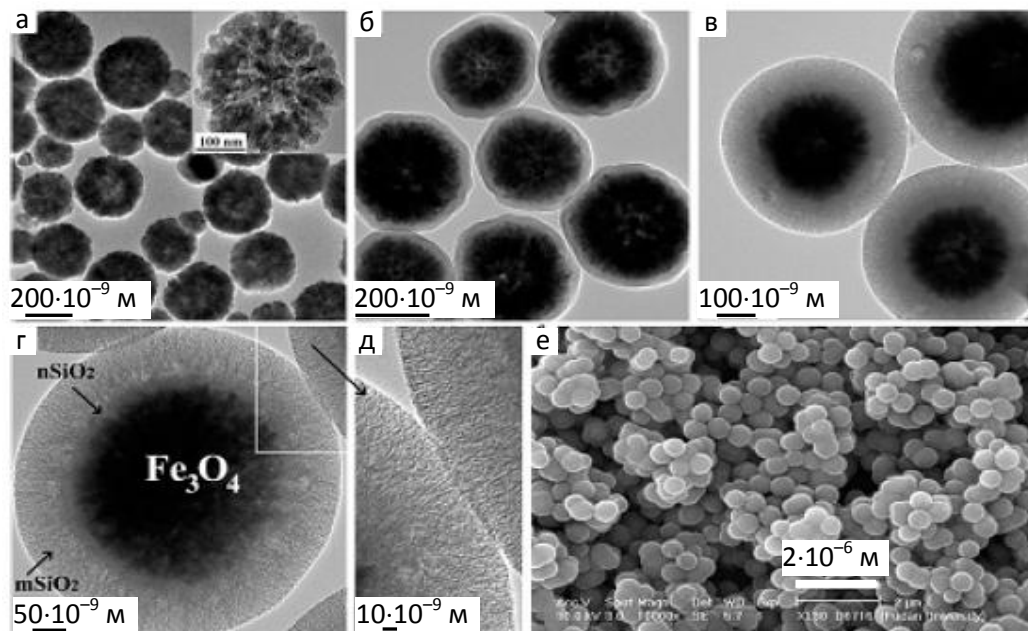


Рис. 1.3. ТЕМ-зображення: (а) Fe_3O_4 наночастинок, (б) $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{nSiO}_2$, (с-е) $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{nSiO}_2/\text{mSiO}_2$ мікросфери, SEM-зображення (ф) $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{nSiO}_2/\text{mSiO}_2$ мікросфери [114]

Утворена оболонка викликає електростатичне відштовхування модифікованих частинок $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{nSiO}_2$ і запобігає їх агрегації. Мезопориста

оболонка сіліцій (IV) оксиду з надзвичайно високою площею поверхні ($365 \text{ м}^2/\text{г}$) дозволяє розміщувати на ній численні функціональні групи, внутрішня пористість може бути використана для адсорбції та інкапсуляції різноманітних споживних речовин: вітамінів, мінералів та ін.. Відомо отримання агрегативно-стійких високодисперсних металевих частинок срібла хімічним способом диспергування цього металу завдяки відновленню іонного срібла до молекулярного стану у водно-спиртовому середовищі в присутності водорозчинного полімеру[136].

Огляд інформаційних джерел з питань методів отримання наночастинок показав, що існує великий набір методів синтезу наночастинок мінерального походження типу феритів, зокрема, Fe_3O_4 , різної дисперсності і з різними властивостями поверхні. Однак варто зазначити, що самі по собі такі наночастинок в харчовій промисловості використовуються вкрай рідко, що пояснюється такими причинами, як: 1) низька стабільність наночастинок в полярних і неполярних розчинах; 2) порівняно висока токсичність одержуваних наночастинок; 3) труднощі подальшої функціоналізації поверхні наночастинок (наприклад, певною технологічною обробкою, молекулярними лігандами, поживними речовинами, мітками та ін.).

Достатні та необхідні умови застосування наночастинок мінерального походження в технології харчової продукції. Слід зазначити, що ринкові тенденції формування асортименту харчової продукції зумовлені інноваціями у її рецептурному складі, спрямованими на зниження собівартості, підвищення споживчих властивостей та термінів зберігання. Особливо важливо відзначити, що щороку відбувається зростання цін на сировину. На жаль, низка основних інгредієнтів є дорогою імпортною сировиною, у зв'язку з чим пошук нових сировинних ресурсів вітчизняного виробництва, що дозволить знизити собівартість харчових продуктів при збереженні якості, є актуальним завданням для виробництва харчової продукції. Таким чином, однією з можливостей створення конкурентоспроможної за ціною продукції є економне й ефективне використання дорогої сировини. Існують різні шляхи під час розв'язання цього

питання, але головним з них є впровадження конкурентоздатних ресурсозберігаючих технологій, зокрема нанотехнологій та використання нанодобавок, у тому числі мінерального походження.

Однак стосовно досліджень щодо впливу нанодобавок мінерального походження на процеси геле- і піноутворення, стабілізацію гетерогенних дисперсних систем, емульгувальну, жиро- і водоутримувальну здатність харчової продукції з поліфазною структурою інформаційні дані є недостатніми й необхідні додаткові дослідження.

У зв'язку з цим дослідження функціонально-технологічного потенціалу природних мінеральних ресурсів як сировини для харчових нанодобавок з точки зору їх впливу на структурно-механічні, фізико-хімічні, мікробіологічні, органолептичні властивості, а також якість, терміни зберігання і економічну ефективність виробництва як харчових систем, напівфабрикатів, так і виготовлених з них виробів є актуальним.

Для розв'язання цього актуального завдання необхідний комплексний підхід до розроблення технологічних рішень для виробництва харчових продуктів, який повинен базуватися, з одного боку, на дослідженні впливу мінеральних нанодобавок на структурно-механічні й технологічні показники харчових систем, напівфабрикатів з метою обґрунтування їх функціонально-технологічного потенціалу, що має значення для забезпечення якісних характеристик готових харчових виробів за фізико-хімічними, органолептичними показниками та показниками безпеки, з іншого, на хід технологічного процесу виробництва харчової продукції, що впливає на економічну ефективність такого виробництва.

Відомо, що зміна розмірів і морфологічних характеристик наночастинок приводить до змін їхніх фізико-хімічних показників, що різко розширюють спектр корекції функціонально-технологічних властивостей застосування їх в промисловості, зокрема харчовій [7, 137, 138, 44–48].

Розмір наночастинок є критичним, але не єдиним параметром, що визначає значною мірою її властивості. Залежно від розміру можуть

змінюватися властивості наночастинок, такі як магнітні, фізико-хімічні, адсорбційні, токсичність і багато інших. Крім дисперсності, на фізико-хімічні показники наночастинок істотно впливає їхня природа і морфологія: тип кристалічної решітки, наявність дефектів структури, анізотропія, товщина і структура приповерхневого шару, характер взаємодії між складовими елементами наноструктури [33, 46].

Для створення необхідних функціонально-технологічних властивостей харчових систем з поліфазною структурою достатній *потенціал* притаманний наночастинкам Fe_3O_4 , який базується передусім на фізико-хімічних характеристиках і, в першу чергу, на їх дисперсності і морфології. Тобто зміна розмірів і морфологічних характеристик нанорозмірних частинок приводить до змін їх фізико-хімічних показників та функціонально-технологічних властивостей [33, 45]. Цьому принципу буде відповідати концепція технології харчової нанодобавки, яка передбачає використання її повного потенціалу (який зумовлений фізико-хімічними і колоїдними властивостями) як покращувача харчових систем, а мета технології нової харчової нанодобавки – формування необхідних функціонально-технологічних властивостей та показників безпеки харчової продукції, що дозволяє адаптувати наукоємні харчові нанотехнології до різних умов виробництва (підприємств харчової галузі, закладів ресторанного господарства тощо) з отриманням доданої вартості. Незважаючи на величезний прогрес застосування нанодобавок у харчових технологіях та різноманіття науково-практичних робіт у галузі нанотехнологій, ця тема потребує подальшого ретельного вивчення. Тому ця робота присвячена вивченню доцільності застосування феритових наночастинок типу Fe_3O_4 як покращувача харчових систем.

1.3. Стан та перспективи впровадження нанотехнологій та наноматеріалів у технологіях харчової продукції з поліфазною структурою

На думку вчених, застосування нанотехнологій у виробництві харчової продукції сприяє формуванню абсолютно нового класу харчових продуктів – “нанопродуктів”, які з часом витіснять з ринку генномодифіковані продукти [139, 140]. Потенційні переваги використання наноматеріалів у технологіях харчової продукції пов’язані з їх властивостями: підвищення біодоступності, протимікробна дія, поліпшення функціонально-технологічних і сенсорних властивостей та забезпечення адресної доставки біоактивних речовин [141].

Поняття “наноїжа” вперше було використано в 2005 р. на першій конференції Nano Food (Нідерланди). У харчовій промисловості нанотехнології становлять значний інтерес з точки зору створення широкого асортименту якісних продуктів нового покоління із заданими функціонально-технологічними властивостями, показниками безпеки та продовженим терміном зберігання свіжості [142]. На рис. 1.4 наведено матрицю нанотехнологій у харчовій науці і технологіях.

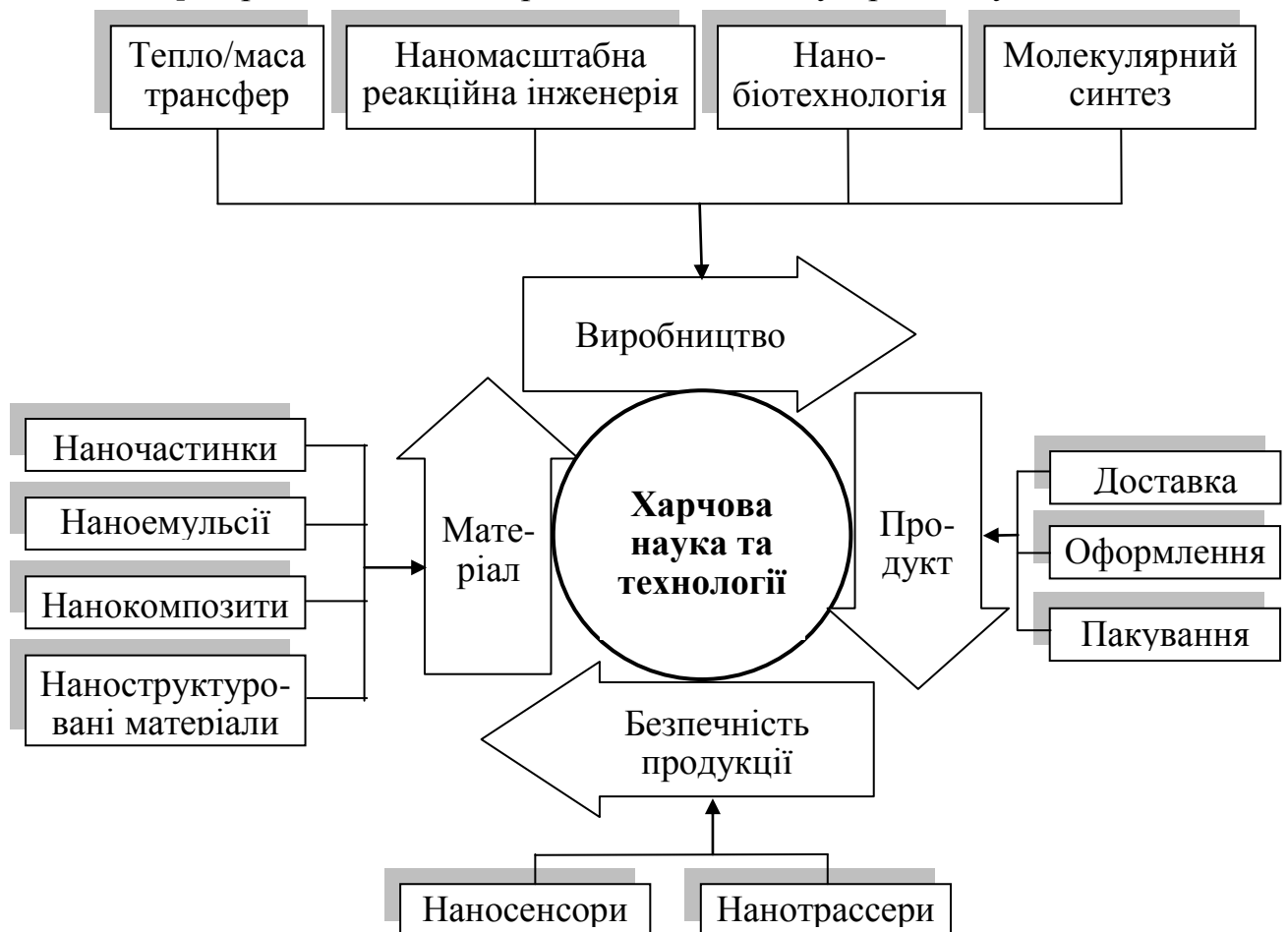


Рис. 1.4. Матриця нанотехнологій у харчовій науці і технології

Сьогодні понад 400 компаній займаються дослідженнями в галузі використання нанотехнологій у виробництві продуктів харчування і пакувальних матеріалів. На світовому ринку вже доступні понад 300 nanofood-продуктів. До “nanofood” відносять харчові продукти, на етапі вирощування, виробництва, переробки або пакування яких використовуються нанотехнологічні методи та наноматеріали [12, 143–145].

Також відомі характеристики наночастинок, що покращують засвоєння і біодоступність мікроелементів, вітамінів і деяких інших харчових речовин; беруть участь у створенні продуктів харчування, які мають поліпшені або принципово нові функціонально-технологічні властивості [146–149].

Проблеми застосування нанотехнологій у виробництві продуктів харчування, а саме удосконалення процесу виробництва і пакування харчової продукції; поліпшення споживних властивостей; створення “функціональних” харчових продуктів; збільшення продуктивності; зменшення собівартості готової продукції досліджували багато фахівців: Павлюк Р. Ю.[3, 150, 151], Погарська В. В. [3, 150, 151], Тутельян В. О.[143, 152, 153], Гмошинський І. В.[143, 153, 154], Кобаса І. М. [155, 156], Пасічний В. М. [7], Хотимченко С. А. [143, 153, 154], Попов К. І. [157–159], Филипов А. М. [157, 159], Жердев А. В. [154], Карпенко Д. В. [160, 161], Сидоренко Ю. І. [162], Ivask A. [163], Mozafari M. R. [40, 164], Augustin M. A. [165], Graveland-Bikker J. F. [166–168], Garti N. [169, 170] та інші. Таким чином, сьогодні нанотехнології вже постають як назріла реальність у харчовій промисловості.

Розвиток нанотехнологій у виробництві продуктів харчування має базуватися на таких загальновідомих положеннях: соціально-економічні та нутріціологічні аспекти харчування; фундаментальні і прикладні постулати технології та біотехнології харчових виробництв [142, 171, 172]. При цьому можна виділити такі основні шляхи застосування нанотехнологій у технологіях харчової продукції [39, 171]:

– харчові технології (нанорозмірні інгредієнти, добавки, харчові добавки та функціональні харчові продукти);

– матеріали, що контактують з харчовими продуктами.

З аналізу інформаційних джерел випливає, що на сьогодні основними напрямками досліджень у галузі технологій харчової продукції є такі: розроблення технологій виробництва наноінгредієнтів (наночастинок, нанониток, нановолокон, нанокапсул і т.д.); розроблення нанокомпозиційних матеріалів для харчових продуктів заданого складу з необхідними органолептичними показниками; розроблення нових пакувальних матеріалів з використанням нанотехнологій, що забезпечують тривале зберігання і безпечність готового продукту [144–149].

Для застосування нанотехнологій в харчовій продукції існує безліч можливих способів, багато з яких зараз перебувають в процесі розроблення або тільки в стадії впровадження на ринку. Принципово розрізняються способи їх застосування для харчових продуктів [4, 157, 173, 174]:

- nano inside – застосування безпосередньо в складі продукту як добавки або функціонального компонента;
- nano outside – застосування наноматеріалів як пакувальних матеріалів або як предметів першої необхідності.

Наноматеріали розробляють для використання на всіх етапах просування харчової продукції “від лану до столу” і вже використовують у процесі вирощування, виробництва, переробки, пакування, зберігання і транспортування харчових продуктів. Так, наносуспензією проводять передпосівну обробку насіння пшениці, посадкового матеріалу столового буряку та картоплі з метою створення оптимальних умов для росту й розвитку. А це сприяє підвищенню врожайності на (20...25)% [175].

У харчових нанотехнологіях інтенсивно впроваджується використання нанонутрієнтів, нанотранспортних систем, нанокапсульованих харчових речовин, наноструктурованих харчових добавок, наноматеріалів для пакування

харчових продуктів, наносенсорів і нанодатчиків для контролю за якістю і безпечністю їжі [34, 35, 40, 143]. Конструюють прилади із застосуванням наносенсорів, здатних здійснювати тотальний моніторинг продуктів на предмет виявлення різних небезпечних агентів у реальному часі безпосередньо в процесі виробництва [176– 180].

Нині фахівці харчової галузі широко використовують можливості нанотехнологій для підвищення біодоступності багатьох вітамінів, а також їх попередників. Наприклад, вітаміни і прекурсори, нерозчинні в воді, роблять розчинними шляхом формування наночастинок [181]. Вчені ХДУХТ (м. Харків) Павлюк Р. Ю., Погарська В. В. та ін. розробили низку харчової продукції з вітамінізованими нанодобавками: три види і рецептури каротиноїдних («Сонячних») булочок для сендвічів для здорового харчування під загальною назвою «СанРол», які відрізняються кількістю введених каротиноїдних нанодобавок з моркви, гарбузу, обліпихи; три групи сокових нанопаїв на основі кріодобавок із хлорофілвмісних, каротинвмісних та антоціанвмісних плодів та овочів і фітоекстрактів для оздоровчого харчування, які мають однорідну стабільну консистенцію та при зберіганні не розшаровуються, мають і неяскраво виражений натуральний колір (жовтий, зелений, рожево-вишневий), оригінальний смак й аромат та не містять синтетичних компонентів [3, 150, 151].

Унікальні властивості наноструктур і наноматеріалів, включаючи фізичні, хімічні та біологічні властивості, значно відрізняються від їх об'ємних аналогів, змінюють розуміння біологічного та фізичного походження в харчових системах. У кількох недавніх звітах й оглядах було виявлено потенційне застосування нанотехнологій у харчовій промисловості для підвищення безпеки харчових продуктів, поліпшення упаковки, обробки й харчування [182].

Застосування наноматеріалів в упаковці харчової продукції дозволяє створювати матеріали, що забезпечують захист продукції від окиснення

(бар'єрні матеріали), ультрафіолетового впливу, мікробіологічного псування; також матеріали, що інформують про стан продукції (біочіпи, наночіпи, наносенсори) [183–187]. Отримання пакувальних матеріалів з покращеними властивостями для збільшення термінів придатності харчової продукції може досягатися за рахунок вмісту в упаковці нанодобавок [183, 184]. Матеріали, що містять в своєму складі нанодобавки, називають наноконпозиційними (наноконпозитами). Наноконпозити застосовують для посилення бар'єрних властивостей пакувальних матеріалів. Полімерні плівки металізують за допомогою алюмінію як бар'єра для газу і світла вже протягом десятиліть [184]. Так, полімерні конпозити, що містять наночастинки глини є першими наноконпозитами, що з'явилися на ринку, як затверджені матеріали (з поліпшеними газобар'єрними властивостями) для упаковки їжі. Мінерал з глини, що використовується в цих наноконпозитах, – бентоніт. Глини є одним з найстаріших і найбільш важливих типів доступних колоїдних матеріалів. Харчова упаковка на основі наноглини збільшує термін придатності чутливих до окиснення харчових продуктів за рахунок підвищення водо- і газового бар'єру полімерного матеріалу. Повідомлялося про використання наноглини для виготовлення пляшок для пива і газованих напоїв; також про те, що наноглини покращують механічні властивості, термічну стабільність і вогнестійкість полімерних упаковок [188]. Полімерні наноконпозити, що містять наночастинки металів і їх оксидів, були розроблені для антимікробної “активної” упаковки, абразивної стійкості, ультрафіолетової абсорбції і / або міцності. Концепція активної упаковки, що містить наночастинки (Ag-NPs, ZnO-NPs, MgO-NPs, TiO₂-NPs) з антибактеріальними, антиоксидантними та сорбційними властивостями, викликає підвищений інтерес через її вплив на окисну, мікробну безпеку; збільшення терміну зберігання харчової продукції [189]. Наночастинки срібла (Ag-NPs) завдяки біоцидним і біостатичним властивостям наносять на поверхню плівок, тому що колоїдні Ag-NPs є ефективними проти різних грибів, грамполітивних і грамнегативних патогенів,

таких як *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Aspergillus niger*, *Penicillium funiculosum*, *Chaetomium globosum*, *Aspergillus terreus*, і *Aureobasidium pullulans* [190, 191]. Наночастинки TiO_2 (TiO_2 -NPs) є абсорбентами ультрафіолету, тому запобігають деградації продукту при впливі ультрафіолету в таких пакувальних матеріалах, як полістирол, поліетилен і полівінілхлорид [2, 171]. Нітрид титану у формі наночастинок (TiN -NPs) дозволений в ЄС для використання як добавки або допоміжного засобу для виробництва полімерів у пластмасових матеріалах, що контактують з харчовими продуктами (Регламент ЄС 1183/2012) [192].

Найбільший інтерес представляє застосування нанотехнологій у пакувальних матеріалах, здатних розкладатись біологічним шляхом. Біонанокompозити — гібридні наноструктуровані матеріали з поліпшеними механічними, термічними і бар'єрними властивостями. Застосування таких наноматеріалів не тільки сприяє збереженню харчових продуктів і подовженню терміну їх придатності, але й захищає навколишнє середовище шляхом заміни полімерних пластикових матеріалів. Три типи сполук використовують для отримання біонанокompозитів, а саме: 1) природний полімер (крохмаль, целюлоза, полімолочна кислота, желатин, колаген, хітозан); 2) неорганічні глини (монтморилоніт, клоїзит); 3) пластифікатор (гліцерол, рослинні олії, триетилцитрат) [2]. З розвитком нанотехнологій ефективних упаковок з'являються їх нові функціональні властивості, такі як антимікробіологічна активність пакувальних матеріалів, здатних розкладатись біологічним шляхом [2, 35].

Наноматеріали використовують в активному пакуванні, яке передбачає поглинання або сприяння утворенню певних хімічних сполук. Як кисневі пастки застосовують наночастинки металів і їх оксидів, полімерні смоли, здатні до швидкого окиснення, а також низькомолекулярні органічні сполуки, такі як аскорбінова кислота [35].

Нанотехнології є важливими в так званому “розумному пакуванні”, метою якого є контроль якості упакованих продуктів. Воно базується на

здатності індикаторних наносполук реагувати з хімічними речовинами, які утворюються внаслідок окиснення чи мікробіологічного псування харчових продуктів. Наприклад, під час зберігання упакованого м'яса птиці внаслідок мікробіологічного псування накопичується гідрогенсульфід H_2S , який реагує з тонким шаром наносрібла. Останній має світло-коричневий колір, але при поступовому утворенні Ag_2S , колір шару наносрібла поступово змінюється на прозорий. Для контролю за вмістом кисню всередині упаковки застосовують світлочутливі наночастинки [35].

Наноматеріали також використовується як покриття, що наносяться на пластикові ємності з метою обмеження дифузії газу і збільшення терміну зберігання харчової продукції, а також у фільтрах для очищення води. З різних наноструктур пластмаси можуть отримати різну газо- і водопроникність, відповідно до потреб резервування фруктів, овочів, напоїв, вина тощо. Фірма “Макдональдс” використовує упаковки з інкорпорованими наночастинками клею на основі крохмалю як контейнери для гамбургерів. Раніше з цією метою використовували клей на основі нафтопродуктів [12].

Сьогодні у світі найбільш інтенсивно розвиваються напрями експресного детектування патогенів в їжі, отримання ефективних харчових антиоксидантів і розроблення принципово нових методів оцінки якості їжі. Нинішні дослідження в галузі харчових технологій спрямовані на розроблення наноматеріалів, поверхня яких може реагувати на бактеріальне забруднення і протидіяти розмноженню бактерій. При цьому наносенсиори, розміщені на таких матеріалах, здатні вчасно виявляти хімічні та біологічні забруднювачі й аналогічно наномірним фільтрам для води сприяти значному підвищенню безпеки та якості харчових продуктів [193]. Завдяки вбудованим наносенсорам в упаковці споживачі матимуть можливість “читати” продукцію всередині. Датчики допоможуть оцінити загальний стан продукту і попередити споживача перед їжею про початок його псування [194]. Використання наночипів так само передбачається з метою ідентифікації умов і термінів зберігання харчової

продукції та виявлення патогенних мікроорганізмів. З метою виявлення патогенів у їжі та їх діагностики передбачено розроблення і впровадження нанорозмірних біосенсорів. Більш того, група вчених на чолі з Харольдом Крейгхедом (Harold Craighhead) з Корнелльського Університету у співпраці з Річардом Монтанья (Richard Montagna) розробила новий прилад, що вміє розпізнавати пріони в харчових продуктах [195]. Розроблені наносенсори, які під час контакту з харчовими патогенами викликають специфічну флуоресценцію [34, 35]. Слід зазначити, що основним завданням наносенсорів є зниження часу, необхідного для детектування патогенів, з декількох днів до кількох годин чи навіть хвилин. Такі наносенсори включають, наприклад, до складу пакувальних матеріалів, де вони слугують “електронним носом”, який здатен детектувати хімічні сполуки, які утворюються внаслідок псування харчових продуктів. Цей аналітичний метод використовують, зокрема, для розрізнення різних сортів вина [179]. Інші типи наносенсорів базуються на мікрогідродинамічних пристроях і використовуються для ефективного визначення патогенів у реальному часі й з високою точністю [34]. Професор нанобіотехнології і керівник дослідницької групи в Кентському університеті Ян Брюс вважає, що нові матеріали дозволять значно підвищити ефективність бактеріологічного контролю безпеки харчових продуктів [196]. Показано навіть можливість інактивації афлатоксину В₁ озоном, розчиненим у воді, у поєднанні з гідрозолем модифікованих наноалмазів [197]. Іншим класом біологічних сенсорів вважають наноконсолі. Їхній детекторний принцип полягає у здатності визначати фізичний чи електромеханічний сигнал біологічно-зв’язувальних взаємодій, зокрема між антигеном і антитілами, ензимом та субстратом чи кофактором і рецептором або лігандом. Наноконсолі містять тонкий шар кремнієвого матеріалу, який має здатність розпізнавати білки і детектувати патогенні бактерії і віруси. Визначення патогенів базується на їх здатності вібрувати на різних частотах, залежно від біомаси патогенних організмів [177]. Наноконсолі можна модифікувати шляхом приєднання антитіл до кремнієвої

поверхні, наслідком чого є зміна резонансної частоти вібрування залежно від приєднаної маси. Gfeller K.Y. та співробітники детектували мікроорганізми *Escherichia coli*, які є індикатором фекального забруднення води і харчових продуктів, за допомогою консольного сенсора, покритого шаром полісахарида агарози [180]. Відносний вміст вологи шару агарози й вологого середовища знаходяться в рівновазі. Із збільшенням концентрації мікроорганізмів на поверхні поживного шару агарози остання для відновлення рівноваги поглинає пару води з вологого середовища, що приводить до зміни маси і, таким чином, характеристичної частоти вібрації консолі.

Упровадження нанотехнологій в повсякденне життя в галузі пакування харчових продуктів є найбільш очікуваною й прогнозованою надією найближчого майбутнього. Деякі упаковки харчових матеріалів оснащені нанодатчиками, призначеними для відстежування як внутрішніх, так і зовнішніх умов харчових продуктів, пелет і контейнерів по всьому ланцюгу поставок. Така упаковка може відстежувати температуру або вологість з плином часу, а потім надавати відповідну інформацію про ці умови [198]. Передбачається, що додавання наночастинок сприятиме одержанню дезінфікування тари та упаковки, збільшенню стійкості пакувальних матеріалів до дії світла і вогню, посиленню механічних і теплових характеристик і зменшенню газопоглинання. Ці властивості можуть значно збільшити термін придатності виробу, ефективно зберігати аромат і колір, сприяти безпечному транспортуванню і використанню. Вже тепер наноматеріали знаходять застосування для отримання більш легких, міцних і термічно стійких пакувальних матеріалів, які мають антимікробну дію. Основний напрям подальших розробок — створення “розумної” упаковки, яка зможе зберігати корисні властивості продукту та подовжувати термін дії його придатності до споживання, запобігати псуванню продукту, змінювати свої властивості залежно від змін умов зберігання і самостійно ліквідувати пошкодження. Передбачається, що протягом наступного десятиліття нанотехнології змінять

25% бізнесу, пов'язаного з пакуванням харчових продуктів. За прогнозами науковців нанотехнології будуть застосовувати в усій галузі виробництва упаковки [12, 194].

Харчові нанотехнології знайшли застосування в створенні абсолютно нових продуктів харчування, що забезпечують специфічну збалансованість лікувально-профілактичних продуктів і товарів масового попиту [157, 173, 174, 199–202]. Так, казахські вчені розробили композиції біологічно активних нанодобавок рослинного походження (зокрема, на основі звіробою), які здійснюють максимально м'який профілактичний вплив на організм людини без побічних ефектів і покращують якість життя людей, схильних до депресій [203].

Розроблювані на основі нанотехнологій харчові добавки, смакоароматичні інгредієнти можуть надавати самому продукту різні органолептичні властивості (колір, аромат, текстуру) залежно від їхньої технологічної обробки [204]. Використання деяких нутрієнтів (мінеральних речовин, вітамінів і антиоксидантів) у вигляді наночастинок або інкапсулювання їх [139, 205–207] дозволяє не тільки поліпшити засвоюваність харчових речовин у складі збагачених продуктів, але і в значній кількості випадків уникнути ефектів хімічної або біологічної несумісності нутрієнтів. У роботах [203, 208–211] для підвищення харчової цінності та біодоступності нутрієнтів у технологіях кисломолочної і хлібобулочної продукції розроблені композиції нанодобавок на основі: наноструктурованого цільного зерна вівса, проса і кукурудзи [212]; зернових і бобових культур [208, 209]; зернового наповнювача фітомілли вівса [209, 211].

Нанонутрієнтами називають харчові речовини, дисперговані до нанорозмірних величин з метою поліпшення їхньої біодоступності. Найбільш актуальним у цьому напрямку нині вбачають створення нових форм мікроелементів. Зокрема, пропонують використовувати нанодисперсний фосфат заліза і наночастинки селену (Se-NPs), які не проявляють токсичної дії у

дослідах на тваринах. Доцільність застосування подібних форм мікроелементів зумовлена їхньою значно меншою токсичністю і кращою біодоступністю, порівняно з неорганічними солями. Нанотранспортні системи сприяють підвищенню засвоюваності нутрієнтів за рахунок пов'язування останніх з нанорозмірними носіями. Наноінкапсулюванню піддають вітаміни, ліпіди, біоантиоксиданти, смакові приправи, біологічно активні речовини. Метою цієї нанотехнології є подолання несумісності різних інгредієнтів і, знову ж таки, підвищення біодоступності біологічно активних речовин завдяки їх захищеності від деградації під впливом шлункового соку. Нанокapsули додають до різних харчових продуктів з метою подовження термінів придатності, поліпшення смакових якостей і поживної цінності [213]. Наноінкапсулювання харчових речовин також може застосовуватися з метою маскування небажаного смаку або запаху деяких харчових речовин (наприклад, риб'ячого жиру) або з метою отримання водорозчинної форми ефективних антиоксидантів (наприклад, наноструктурованого лікопену) тощо [214].

Слід відзначити, що низка харчових добавок нанорозмірного масштабу і нанокapsул, що містять кілька харчових інгредієнтів, уже сьогодні доступні для придбання [215].

Як й біологічно активних речовин одними з найбільш перспективних є наноліпосоми. Коли молекули амфифільних (мають як гідрофільну, так і гідрофобну природу) сполук, наприклад фосфоліпіди потрапляють у водне середовище, вони в певних умовах можуть утворювати везикули фосфоліпідних бішарів – наноліпосоми. Під час утворення цих композицій гідрофільні сполуки можуть проникати всередину ліпосом [40]. Ліпофільні сполуки, такі як деякі вітаміни і харчові добавки, можуть включатись у бішари при їх розчиненні разом з ліпідами. Одним з перших використань ліпосомів у харчових продуктах була технологія сиру [40]. Інкапсуляція ензимів, джерелом яких є мікроорганізми *Lactococcus/actis*, за допомогою молочних жирів дозволила значно поглибити смакові якості сиру за рахунок збільшення

концентрації речовин, які формують смакові якості – диацетилу та ацетоїну. Альтернативним методом інкапсуляції ензимів є використання ліпідних везикул у формі ліпосом чи наноліпосом [2, 40].

Відомо, що додавання протеаз, які містяться всередині багат шарових везикул, до сирної маси інгібує швидкий протеоліз β -казеїну, сприяючи зростанню твердості сиру після завершення ферментації і підтримуючи його структуру шляхом попередження дії ензимів. Подібні результати були отримані при дослідженні активності протеаз, інкапсульованих у ліпосомах під час процесів заморожування-розморожування [40]. Ензими в ліпосомах звичайно орієнтуються між ліпідними бішарами і, таким чином, дифундують більш швидко, ніж ті, що знаходяться у гідрофільному просторі. Більшість ліпідних везикул з'єднуються з мембранами жирів молока, деякі залишаються в сироватці, у той час як окремі негативно заряджені везикули зв'язуються з казеїном. Ліпосоми, які розміщені близько до глобул жирів молока, з часом взаємодіють з мембраною, дестабілізуючи її, а ті ліпосоми, що знаходяться в сироватці, агрегуються з утворенням великих везикул [2, 40].

Ліпосоми також застосовують для інкапсуляції ліпаз. Вони сприяють зниженню твердості сиру Чедер, підвищуючи його когезивність й еластичність. Оптимізація основних параметрів ліпосом, таких як їх тип, склад мембран, концентрація інкапсульованого ензиму, дозволяє виготовляти сир з відмінними текстурою і смаковими характеристиками при скороченні тривалості виробництва наполовину і зменшенні кількості використаних ензимів у 100 разів [40]. Крім здатності істотно знижувати тривалість виготовлення сирів, наноліпосоми використовують для збагачення продуктів вітамінами і, таким чином, підвищення їх харчової цінності. Зокрема, інкапсуляція в наноліпосомах гальмує розклад вітамінів. і як у сирі, виготовленому з включенням вітамінів у наноліпосоми, кількість корисного вітаміну D на 30 %-ів є більшою, ніж при збагаченні виробів за стандартною процедурою [2, 40].

Іншою важливою галуззю застосування наноліпосомів є захист консервантів. Прикладом є їх використання в технології таких сирів, як Гауда, Ементаль та Едем [40, 178]. Ці сири мають підвищену тенденцію до росту патогенних і гнильних мікроорганізмів, включаючи спороутворюючі бактерії. Таке псування пригнічується шляхом додавання ензиму лісозим, який має білкову природу. Його недоліком при використанні у молочних виробках вважається приєднання до казеїну, що знижує ефективність лісозиму. Інкапсуляція його у наноліпосоми дозволяє цього уникнути [178].

Таким чином, використання наноліпосом в харчових технологіях — зручний і безпечний спосіб забезпечення стабільності чутливих біологічно активних компонентів і харчових добавок.

Отже, наноструктуровані харчові добавки надають продуктам нові, незвичайні функціональні властивості. Як правило, такі системи складаються з біосумісних матеріалів, таких як пептиди, вуглеводні, мономери ліпідів, котрі здатні піддаватися біодеградації. Крім того, наноструктуровані форми здатні ефективно уберегти харчові продукти від бактеріального обсіменіння і забезпечити продовольчу безпечність [12].

Сфера застосування нанодобавок у харчовій промисловості постійно розширюється [204, 216–219]. На сьогоднішній день на світовому ринку вже нараховується кілька сотень харчових продуктів, вироблених з використанням нанотехнологій. Переважно, така продукція поширена на ринках США, Азіатського регіону і Європи. Серед харчових “нанопродуктів”, які вже надійшли або скоро надійдуть у продаж, можна відзначити молочний продукт компанії “Friesland Campina” з наночастинками для більш швидкого засвоєння кальцію [30]. В Австралії випікають хліб з додаванням нанокапсул, що містять жир тунця [30]. У Росії в хлібобулочні вироби як антисептичний засіб додають срібний нанобіокомпозит [220, 221]. Застосування наноактивованих водно-жирових емульсій при виробництві м'ясних фаршевих продуктів дозволяє виключити з рецептур хімічні добавки (карагенан, фосфати) і поліпшити

технологічні показники м'ясопродуктів (вихід, органолептичні характеристики) [222]. Абсолютно новими для харчової промисловості є інгредієнти, отримані із застосуванням технології міцелювання на нанорівні. Наприклад, використання запатентованого нанотехнологічного методу компанії "Aquanova AG" (Німеччина) дозволяє отримувати продукти тонкого органічного синтезу "NovaSOL®", що являють собою міцелярні структури. Основою таких продуктів є так звані харчові міцели діаметром близько 30 нм. Солюбілізат "NovaSOL® C" розчинний як у воді, так і в жирі, термічно і механічно стабільний і рН-незалежний. Внесення у фарш препарату "NovaSOL® C" в кількості 0,05% до маси фаршу дозволяє отримати продукт з динамікою зростання КМАФАНМ в кілька разів нижче, ніж у контрольному зразку. Використання міцельованої форми аскорбінової кислоти "NovaSOL® C", дає такі позитивні ефекти: можливість повної заміни звичайних порошкоподібних антиокисників у рецептурі без погіршення показників окисного псування; використання високої бактеріостатичної активності солюбілізата як єдиного натурального консерванта; досягнення рівномірного і більш стійкого забарвлення; сприятливі економічні показники у зв'язку з одноразовою заміною кількох добавок у рецептурі [223].

Для підвищення стійкості вітамінів при тепловій обробці і зберіганні харчових продуктів їх вводять у вигляді наноемульсій. Встановлено, що при іммобілізації вітамінів в водно-жирових емульсіях зі стабілізаторами на основі альгінату натрію і карбоксиметилцелюлози можна отримувати емульговані системи, які мають підвищену стійкість до теплових режимів, що використовуються при виробництві м'ясної продукції [39, 224]. Отже, вітаміни, пробіотики, жирні кислоти, ліпіди, антиоксиданти, консерванти, білки, ферменти, пептиди можуть бути інкапсульовані шляхом включення в різні нанорозмірні структури, такі як наноемульсії, наноміцели, наноліпосоми, нанокапсули.

Підводячи підсумок, можна сказати, що основними цілями інкапсуляції є: підвищити розчинність (наприклад, барвники, антиоксиданти); поліпшити біодоступність сполук, тобто кількість біологічно активної сполуки, яка засвоюється організмом людини (антиоксиданти, вітаміни, мінерали, ферменти); поліпшити стабільність і термін придатності; для захисту біоактивних молекул і мікроелементів при виробництві, зберіганні, продажу; для забезпечення контрольованого вивільнення біоактивних молекул (тільки в певних частинах шлунково-кишкового тракту, наприклад, вивільнення під дією рН, вивільнення під дією світла).

Таким чином, завдяки впровадженню нанотехнологій можна очікувати розв'язання цілого ряду проблем у харчовій промисловості та харчуванні населення, прагнучи на тлі зростання продуктивності та економічної ефективності виробництва значно поліпшити якість і безпечність харчової продукції. Впровадження нанотехнологій дає харчовій промисловості шанс для одержання величезних прибутків. Тому сотні компаній у світі зараз активно проводять дослідження та розроблення “nanofood”, активно співпрацюючи з державними дослідними установами та приватними підприємствами. Відомо, що наноматеріали вже входять до складу деяких кондитерських виробів (шоколаду, морозива, кремів), косметичних засобів, зубної пасти, різних емульгаторів тощо [2, 142, 206].

1.4. Наноматеріали та нанодобавки мінерального походження (зокрема, оксиди металів) у технологіях харчової продукції

Дефіцит вітчизняної сировини, висока частка низькоякісної імпоротної сировини (зокрема, у м'ясній галузі використання м'яса з вадами PSE I DFD; у хлібобулочній та борошняній кондитерській промисловості переробляється до 50 % від загального об'єму борошна зі зниженими властивостями) та імпортних інгредієнтів з високою вартістю (зокрема, агару, пектину у виробництвах

мармеладно-пастильної продукції тощо), зростаюча конкурентоспроможність змушують виробників шукати нові технологічні рішення для підвищення споживчих властивостей харчової продукції.

Сучасні тенденції розвитку харчової промисловості спрямовані не тільки на виробництво харчових продуктів як таких, а й на виробництво якісних продуктів харчування збільшеного терміну зберігання за умови розширення асортименту харчової продукції з новими функціонально-технологічними властивостями.

Харчовий ринок вимагає технологій, які необхідні для збереження лідерства на ринку харчової промисловості для виробництва свіжих автентичних, зручних і ароматних харчових продуктів, і нанотехнології є відповіддю на цей запит [204]. Створення харчових продуктів з різним рецептурним складом; введення нутрицевтиків; збагачення мінералами і вітамінами; гелеутворювачі і загусники; стабілізатори; добавки з бактеріостатичною, антиоксидантною дією; доставка поживних речовин і наноінкапсулювання ароматизаторів – це шляхи використання наноматеріалів з метою покращення функціонально-технологічних, органолептичних та споживчих властивостей харчової продукції [225]. Наночастинки додаються в багато харчових продуктів для поліпшення властивостей плинності, кольору і стабільності під час обробки або для збільшення терміну збереження свіжості. Наприклад, алюмосилікатні матеріали зазвичай використовуються як протизадирні агенти в гранульованих або порошкоподібних оброблених харчових продуктах, у той час як діоксид титану є звичайною харчовою вибілювальною і освітлювальною добавкою, використовуваною в кондитерських виробках, деяких сирах і соусах [226].

Особливу зацікавленість виробники та науковці як України, так і світу проявляють до наноматеріалів та нанокомпозитів (зокрема, неорганічні сполуки: метали, їх оксиди і солі, нанокомплекси з органічними сполуками), використання яких забезпечує ширші можливості для варіювання,

модифікування та переробки сировинних матеріалів [1, 2, 4, 5]. Значний функціонально-технологічний потенціал для створення асортименту харчової продукції з новими функціонально-технологічними властивостями мають мінеральні (неорганічні) харчові добавки, що зустрічаються в природі або одержувані хімічними методами в промислових умовах. Високодисперсні частинки діоксиду титану, срібла, цинку, оксиду цинку, діоксиду кремнію, платини, золота широко використовуються в харчовій промисловості в різних формах [2, 6, 226]. Це мінеральні барвники і пігменти: карбонат кальцію – E 170, діоксид титану – E 171, оксиди заліза E 172i-ii, срібло – E 174, золото – E 175; кольорокоригувальні речовини (фіксатори і стабілізатори кольору), які найчастіше надають супутнє-консервативну дію: сульфіти, піро- і гідросульфіти E 221, E 222, E 227, нітрат натрію E 251, нітрит натрію E 250 і калію E 249; розпушувачі: карбонат натрію E503i, карбонат калію E501i, гідрокарбонат амонію E500ii, пірофосфати E 450; кухонна сіль NaCl і т.д.[227].

Харчова добавка E 172 (Fe_3O_4) – подвійний оксид ферума. У природі зустрічається у вигляді мінералу магнетиту. Це високодисперсний порошок з розміром частинок 40...50 мкм. E 172 є пігментом і в харчових системах застосовується як барвник, схвалений EFSA (European Food Safety Authority – Європейське агентство з безпеки харчових продуктів) [137].

Діоксид титану (TiO_2) – в природі зустрічається у вигляді мінералів анатаз, рутил, брукит. TiO_2 – це харчовий барвник, схвалений EFSA, відомий як E171. Використовується як відбілювач і барвник. E171 містить частинки TiO_2 , середній розмір яких становить 200...300 нм, може знаходитися фракція частинок розміром <100 нм. Недавнє дослідження показало, що 5...36 % TiO_2 в харчових продуктах знаходиться в діапазоні нанорозмірів [228]. Колоїдний (TiO_2 -NPs) можна знайти в таких продуктах, як цукерки, жувальна гумка, зубна паста, харчові добавки, сонцезахисні креми [229].

Відбувається постійне обговорення всіх аспектів безпеки застосування TiO_2 в його наноформах для харчової промисловості. У вересні 2016 року

EFSA опублікувала відгук про використання E171, заснований на детальному огляді літератури по наночастинках TiO_2 -NPs. Був зроблений висновок про те, що поточний вплив на споживачів харчової добавки E171 (у вигляді TiO_2 -NPs) пов'язаний з її використанням у харчових продуктах, також автори вважають, що він не загрожує здоров'ю людини [230].

Інші метали у формі колоїдних нанорозмірних частинок, що використовуються як *харчові* або *дієтичні добавки*, такі: наночастинки селену (Se-NPs) [231], наночастинки кальцію (Ca-NPs), наночастинки заліза (Fe-NPs) і колоїдні суспензії металевих частинок, наприклад, наночастинки кобальту (Co-NPs), наночастинки золота (Au-NPs), наночастинки платини (Pt-NPs), наночастинки срібла (Ag-NPs), наночастинки молібдену (Mo-NPs), наночастинки паладію (Pd-NPs), наночастинки титану (Ti-NPs) і наночастинки цинку (Zn-NPs) [232].

Оксид цинку (ZnO) – в природі зустрічається у вигляді мінералу цинкиту. Наночастинки оксиду цинку (ZnO-NPs) використовуються в пакувальних матеріалах, що контактують з харчовими продуктами, таких як поліпропілен і поліетилен, як прозорий поглинач ультрафіолетового світла, не виділяючи його в вигляді тепла, тим самим покращуючи стабільність пакувальних матеріалів [233]. Він також використовується в харчових добавках, наприклад, вітамінах [234]. EFSA провела дослідження з оцінки безпечності наночастинок ZnO-NPs, використовуваних у пакувальних матеріалах, що контактують з харчовими продуктами. Був зроблений висновок, що наночастинки ZnO-NPs не мігрують з нанокompозиту до поверхні харчового продукту [233].

Діоксид кремнію (SiO₂). Це харчова добавка E551, яка використовується в харчовій промисловості для запобігання злежуванню, комкуванню (утворенню грудочок). Це один з емульгаторів, присутній у багатьох харчових продуктах, жувальних гумках, сирах, приправах [235]. Відомо використання наночастинок аморфного кремнезему (SAS) для поверхневого покриття пакувальних матеріалів, для очищення напоїв і, в основному, як сипучого агента й агента

проти злежування в порошкоподібних харчових продуктах (E551) [142]. E551 містить первинні частинки, агрегати і агломерати, і частково він містить SiO_2 в нанометровому діапазоні з розмірами <100 нм [236]. Діоксид кремнію (SiO_2) належить до групи дозволених до застосування в технологіях харчової продукції.

Мінеральні (неорганічні) добавки на відміну від органічних мають низку переваг: поширення у природі – є мінеральними ресурсами; досить невисоку собівартість; стійкість до впливу світла, до змін рН середовища, а також стабільність хімічного складу, фізико-хімічних показників і функціонально-технологічних властивостей в широкому інтервалі температур і умов зберігання готової продукції.

Особливий інтерес серед неорганічних харчових добавок становлять нанорозмірні мінеральні добавки, яким притримані специфічні фізико-хімічні показники (завдяки квантово-механічним ефектам в наночастинках), здатні впливати на функціонально-технологічні властивості інгредієнтів харчової продукції [7, 30, 204, 216–222, 137, 138, 236–238].

Сфера застосування нанодобавок в харчовій промисловості досить велика і постійно розширюється [204, 216–219]. Пріоритетними нанодобавками, як перспективними компонентами харчової продукції є наночастинки оксидів цинку (ZnO-NPs) і заліза (Fe-NPs), а також елементарного селену (Se-NPs) і срібла (Ag-NPs) [204, 236–238], завдяки термостабільності і збереженню фізико-хімічних та функціонально-технологічних властивостей при кулінарній обробці і протягом регламентованого терміну зберігання готових виробів. На основі наночастинок ($\text{TiO}_2\text{-NPs}$) дозволений до використання харчовий барвник E171, що отримується з мінеральних порід і застосовується для надання білого кольору [137].

Останнім часом наночастинки срібла (Ag-NP), нікелю (Ni-NP), алюмінію (Al-NP), платіни (Pt-NP), оксиду алюмінію ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-NP}$), діоксиду титану ($\text{TiO}_2\text{-}$

NP), оксиду церію (CeO-NP), оксиду цинку (ZnO-NP), діоксиду кремнію (SiO₂-NP), оксиду нікелю (NiO-NP), оксиду міді (CuO-NP), оксиду олова (SnO₂ -NP), оксиду хрому (Cr₂O₃-NP), оксиду заліза (Fe₃O₄-NP), нітрид титану (TiN-NP) або їх композити (наприклад, аморфний силікат Na-Al) за даними Європейської комісії [239] та на основі інвентаризації Європейського агентства з безпеки харчових продуктів (EFSA) [234] застосовуються в так званих “інженерних харчових нанокolloїдах”. Застосування наночастинок металів, їх оксидів та інших неорганічних сполук ґрунтується на їх унікальних і стабільних фізико-хімічних показниках, які формують необхідні функціонально-технологічні властивості харчових колоїдних наноструктур. Це відкриває їм унікальні і нові можливості застосування в харчовій промисловості для поліпшення якості і безпечності харчових продуктів; збільшення терміну придатності харчових продуктів (збереження свіжості), виявлення патогенних мікроорганізмів, розпізнавання, фарбування, ароматизації, структуроутворення, стабілізації і підвищення харчової цінності [2, 191].

Для поліпшення функціонально-технологічних властивостей м'ясних білково-жирових емульсій пропонується застосування високодисперсного пірогенного кремнезему марки А300 на основі наночастинок (SiO₂-NPs) з розміром від 5 нм до 40 нм [7]. Фахівці НУХТ запропонували водні наносуспензії препарату “Кремневіт” на основі каоліну для поліпшення каркасопружності і підвищення терміну зберігання пшеничного хліба [138]. Зараз у харчовій промисловості значне поширення отримали харчові добавки на основі наносрібла (Ag-NPs), що проявляють унікальні бактерицидні властивості [136, 190, 191, 240–244]. Колоїдне срібло (Ag-NPs) рекомендують також як добавку до раціону при інфекційних захворюваннях, запаленнях шлунково-кишкового тракту; наномідь (Cu-NPs) – для збереження пружності шкіри, запобігання сивини, поліпшення метаболізму заліза; наноплатину (Pt-NPs) – для поліпшення пам'яті тощо [30, 244]. Відомий антимікробний препарат на основі наносрібла (Ag-NPs), що збільшує термін зберігання

копчених ковбас на 100% [136]. Показано, що введення до складу упаковки нанорозмірних частинок титану (Ti-NPs), срібла (Ag-NPs) і цинку (Zn-NPs) дозволяє надати їй нових корисних властивостей, включаючи газобар'єрні властивості, непроникність для ультрафіолетових променів, антибактеріальну активність [30, 136, 162, 228–230, 232, 243, 244]. У ролі основного нанорозмірного компонента фотобар'єрних пакувальних матеріалів використовуються нанорозмірні частинки діоксиду титану (TiO₂-NPs), які мають сферичну форму і середній діаметр близько 20...25 нм [228–230]. Як антимікробні пакувальні матеріали використовуються наночастинки металевого срібла (Ag-NPs), вони мають сферичну форму і розмір частинок – 5...20 нм [190, 191]. Є також розробки щодо використання в антимікробній упаковці наночастинок оксиду цинку (ZnO-NPs) [204, 229, 245–247].

Інші наноколоїдні системи (SiO₂-NPs, наногліни) можуть забезпечити тривале зберігання їжі, блокуючи ультрафіолетове випромінювання, покращуючи механічні та термостійкі властивості, зменшуючи проникність пакувального матеріалу [248]. У результаті полімерні нанокompозити (у складі пакувальних матеріалів) сприяють збереженню показників якості харчових продуктів протягом зберігання, уповільнюючи втрати вологи, процеси перекисного окиснення ліпідів і мікробного псування, а також зміни органолептичних показників: зовнішнього вигляду, смаку, кольору [189, 248].

Встановлено вплив наночастинок срібла (Ag-NPs) на процес формування молочного гелю і його мікрофлору: вони знижують активність технологічної мікрофлори сирних продуктів [249].

Вчені НУХТ (м. Київ) довели можливість стабілізації ξ -потенціалу бурякового соку буферним комплексом з нанокompозитом на основі діоксиду кремнію (SiO₂-NPs), що підтверджує перспективність його використання в технології виробництва м'ясних і м'ясовмісних продуктів. Встановлено, що харчова добавка на основі діоксиду кремнію у формі нанокompозиту в кількості (0,1–0,3) % покращує функціонально-технологічні показники м'ясних

фаршів, а добавка 2,0 % стабілізованого бурякового барвника забезпечує прийнятні органолептичні показники для варених ковбасних виробів [250].

Наноемульсійна технологія для доставки функціональних сполук є однією з нових галузей харчових нанотехнологій, оскільки вона запобігає їхній деградації і покращує біодоступність. Наноемульсії складаються з масляних крапель розміром 10...100 нм, диспергованих у водній фазі, причому кожна масляна крапля оточена молекулами поверхнево-активної речовини, наприклад, наночастинками Fe_3O_4 (Fe_3O_4 -NPs) [251–253]. Наноемульсії (зокрема, емульсії Пікерінга) захищають органічні сполуки (смакові, ароматичні тощо) від виробничих умов і протягом усього терміну зберігання продукту (від окиснення, гідролізу і є термодинамічно стабільними в широкому діапазоні значень рН) [254].

Компанія “Unilever” отримала більш корисне морозиво без шкоди для смаку завдяки застосуванню “Nanoemulsions” через зниження жиру з фактичних 16,0 % до 1,0 %. Компанія “Nestlé” має патент на наноемульсії типу “вода в маслі” з розміром частинок 10...500 нм, які спрямовані на досягнення більш швидкого і простішого розморожування шляхом додавання полісорбатів та інших міцелоутворювальних речовин, у тому числі неорганічних – типу оксидів металів, що сприяють рівномірному розморожуванню заморожених продуктів у мікрохвильовій печі, тобто стабілізації процесу “заморожування-розморожування” [255].

Останнім часом зростає число датчиків на основі наночастинок колоїдних оксидів металів та їх композитів для контролю якості харчової продукції. Так, для виявлення газоподібних речовин (аміаку, диметиламіну, триметиламіну), що утворюються при деградації м'ясних продуктів, використовують сенсори на основі наночастинок TiO_2 -NPs, Au- WO_3 -NPs, ZnO- Cr_2O_3 -NPs, Cr_2O_3 - SnO_2 -NPs, ZnO-NPs [239, 256].

Слід відзначити, що наступна хвиля харчових інновацій потребує зміщення акценту з макроскопічних властивостей на властивості мезо- і

наношквал, оскільки вони згодом контролюватимуть ієрархічні структури в харчовій продукції та функціональність харчових продуктів [215]. Хоча потреба у використанні нанотехнологій у харчовій індустрії зростає з кожним днем, потенційним (еко) токсикологічним ефектам і впливу наночастинок на організм досі приділялося мало уваги [257]. Найчастіше фізико-хімічні показники наночастинок не стабільні, про що повідомлялося в менш ніж 15% записів, що стосуються (еко) токсичності і оцінки ризику наночастинок. Тому перед застосуванням наночастинок у технологіях харчових продуктів необхідно добре розуміти їх потенційний негативний вплив на біологічну систему, також важливо вивчити їх фармакологічну характеристику: фармакінетику, гостру токсичність, цитотоксичність і токсичність при повторних дозах [235].

У межах реалізації завдань ресурсо- та енергоефективності виробництва якісної харчової продукції перспективним напрямом є використання нанодобавок на основі вітчизняних мінеральних ресурсів. Відомі роботи зх. використання природних мінералів як сировини для наночастинок [7, 137, 138]. Однак для застосування їх в технологіях продуктів харчування існує ряд обмежень: наявність домішок, складність видобутку, нестабільність фізико-хімічних показників тощо.

Значний науково-практичний інтерес для технологій харчової продукції становить природний мінерал магнетит (Fe_3O_4), особливо його сталі фізико-хімічні показники і функціонально-технологічні властивості в нанорозмірному стані: колоїдність, полярність частинок, зосередження на поверхні структуроутворювальних катіонів феруму, наявність хімічно активного приповерхневого шару, висока питома поверхня і сорбційна активність, амфотерність, обмежена розчинність у технологічних середовищах ($\text{pH}=1,5\dots 8,0$), стабільність властивостей у всіх діапазонах температур і широкому інтервалі pH [33, 258–261]. Промислове виробництво магнетиту в Україні є досить налагодженим та багатотонажним [44, 45], але воно спрямоване на одержання магнетиту для технічного застосування з

мінімальним розміром частинок (1–2) мкм. Більш дрібні частинки магнетиту одержують подрібненням або методом конденсації – термічної, електролітичної, вакуумної, хімічної та ін. [46–48]. Так, наночастинки магнетиту з розміром від 6 нм до 12 нм застосовуються в медицині, фармації, косметології: це магнітні мазі, креми, пластирі, супозиторії, мікрокапсули, магнітореологічні суспензії, магнітоконтрастні рідини, магнітокеровані сорбенти (Мікромаг-Б, МКС-Б), інтракорпоральні біокоректори – ІКББ і т.д. [49, 258, 259]. Відомо, що такий же хімічний склад має харчовий барвник Е 172 [137] і розмір його частинок не наномасштабу.

Аналіз інформаційних джерел свідчить про те, що практично не використовуються в харчових технологіях нанодобавки, яким притаманна комплексна дія (зокрема, водо- і жируотривальна, емульгувальна, стабілізувальна, геле- і піноутворювальна здатність, загущувальні, тиксотропні, антиоксидантні, бактеріостатичні властивості).

Крім того, сучасні досягнення та досвід вітчизняних і зарубіжних фахівців у галузі нанотехнологій і наноматеріалів дозволяють застосувати одержані результати для створення концепції щодо використання мінеральних (неорганічних) нанодобавок, зокрема подвійного оксиду дво- та тривалентного феруму, зі стабільними фізико-хімічними показниками для коригування функціонально-технологічних властивостей харчової сировини і покращення споживних властивостей харчових продуктів.

Тому розробка науково обґрунтованих технологій харчових продуктів з поліфазною структурою з використанням харчової нанодобавки мінерального походження на основі подвійного оксиду дво- і тривалентного феруму є актуальною науково-технічною проблемою.

Висновки за розділом 1

1. Проведено загальну характеристику нанотехнологій та наноматеріалів; аналіз формування функціонально-технологічних властивостей речовин у нанорозмірному стані згідно з їх фізико-хімічними характеристиками.

2. Проаналізовано стан та перспективи впровадження нанотехнологій та наноматеріалів у технології харчової продукції з поліфазною структурою. Розглянуто асортимент наноматеріалів (нанодобавок), який у ході залучення до технологічних потоків виробництва харчової продукції реалізує проблеми поліпшення споживних властивостей та безпеки харчової продукції.

3. Аналітично досліджено роль наноінгредієнтів мінерального походження у формуванні якості харчової продукції. Не виявлено інформації щодо використання технологічних потенціалів оксидних нанодобавок (зокрема, Fe_3O_4) для забезпечення стабільності харчових систем з поліфазною структурою та одержання якісних наноструктурованих продуктів з подовженим терміном збереження свіжості.

4. Проаналізовано можливі варіанти технологій виробництва наночастинок (зокрема, оксидів заліза) з метою коригування функціонально-технологічних властивостей харчової продукції з поліфазною (гетерогенною дисперсною) структурою.

5. Обґрунтовано доцільність створення нанодобавки мінерального походження шляхом реалізації потенціалу наночастинок (Fe_3O_4), застосування яких дозволить ефективно використовувати функціонально-технологічний потенціал природного мінералу як сировини для нанодобавок, залучити наночастинок в технологічний цикл виробництва харчових продуктів, розробити широкий асортимент конкурентоспроможної продукції з високими споживними властивостями, подовженим терміном збереження свіжості та експортним потенціалом.

РОЗДІЛ 2

ОРГАНІЗАЦІЯ, ОБ'ЄКТ, ПРЕДМЕТИ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У цьому розділі приведений план теоретичних та експериментальних досліджень, подана характеристика об'єкту і предметів дослідження, наведений опис методів визначення показників якості і безпечності сировини, напівфабрикатів і готових виробів, математичного моделювання та обробки експериментальних даних.

2.1 **Методологічні підходи, програма теоретичних та експериментальних досліджень**

Методологія дисертаційного дослідження ґрунтується на аспектному (визначення проблеми дослідження), системному (встановлення взаємозв'язків, цілісності та характеру зв'язків в системі, що досліджується) та концептуальному (розробка концепції дослідження) підходах, які покладено в основу програми теоретичних та експериментальних досліджень (рис. 2.1). При виконанні дисертаційної роботи реалізовано поетапний механізм поширення інновацій, який передбачає підпорядкування єдиній меті взаємозалежні складові системи – логічний та формальний аналіз, логічний та формальний синтез, оцінка ефективності функціонування системи. Досягнення мети дослідження забезпечено синхронізацією циклу: фундаментальні дослідження – прикладні розробки – комерціалізація.

Експериментальна частина роботи виконувалася протягом 2003...2019 рр. у науково-дослідницьких лабораторіях: Української інженерно-педагогічної академії (лабораторії кафедри харчових та хімічних технологій); Харківського торговельно-економічного інституту Київського національного торговельно-економічного університету (лабораторія технології

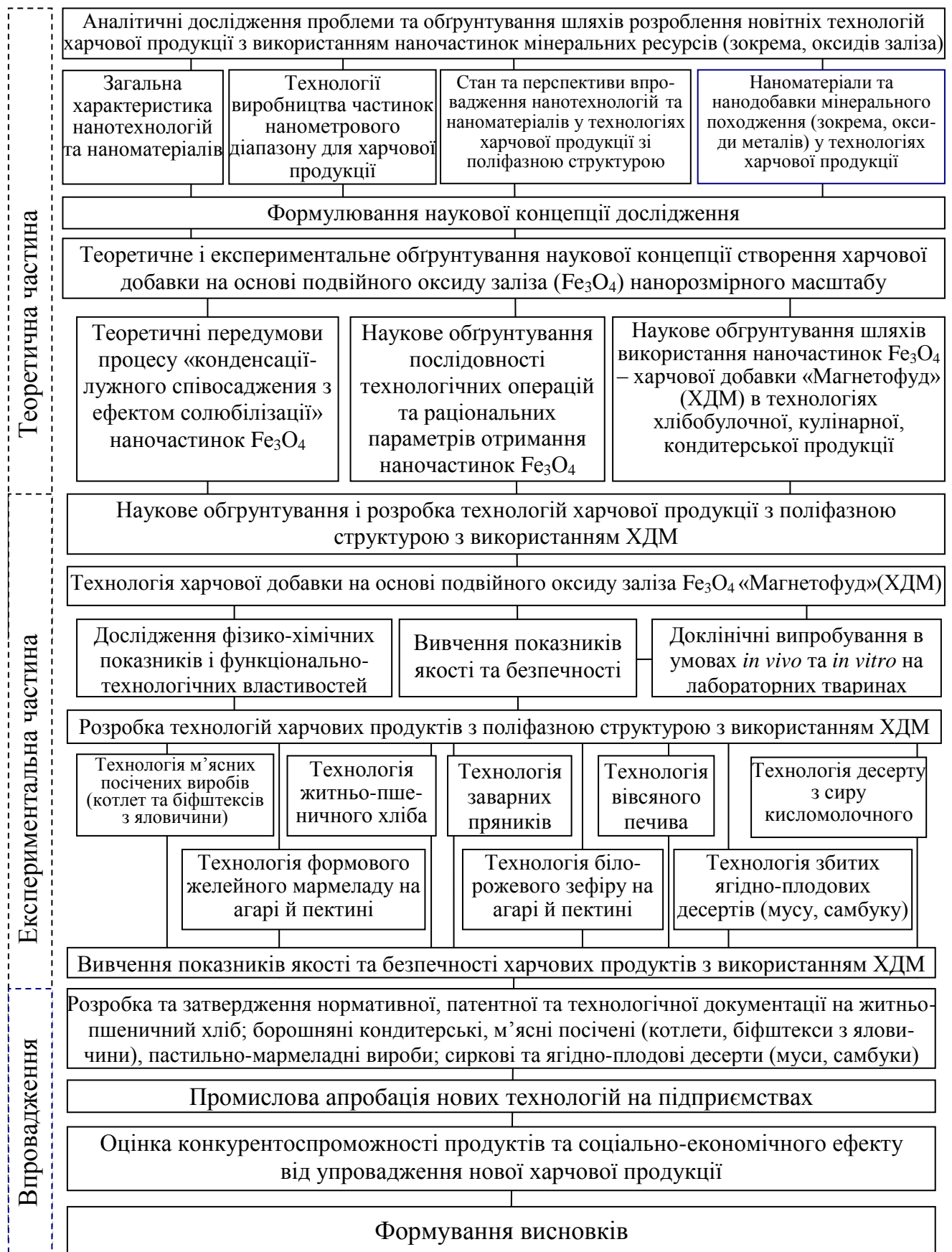


Рис.2.1. План теоретичних та експериментальних досліджень

ресторанної продукції, лабораторія контролю якості та безпечності продукції); Національного університету харчових технологій (Проблемна науково-дослідна лабораторія); Харківського державного університету харчування та торгівлі (лабораторії кафедри фізико-математичних та інженерно-технічних дисциплін; лабораторії кафедри устаткування харчової і готельної індустрії ім. М.І. Беляєва); Науково-технологічного комплексу «Інститут монокристалів» НАН України; Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна (лабораторії кафедри органічної хімії та фізики твердого тіла); Московського державного університету ім. М.І. Ломоносова (лабораторії кафедри фізколоїдної хімії та загальної фізики); фармацевтичної компанії «Здоров'я» м. Харків; Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут»; Національного фармацевтичного університету (центральна науково-дослідна лабораторія); ДУ «Інститут проблем ендокринної патології ім В. Я. Данилевського» (лабораторія аналітичних та фізико-хімічних досліджень); Інститут рослинництва ім. В. Я. Юр'єва НААН м. Харків (лабораторія генетики та біотехнології).

2.2. Об'єкт, предмети та матеріали дослідження

Об'єкт дослідження – технології: харчової добавки “Магнетофуд” та харчових продуктів з поліфазною структурою – житньо-пшеничний хліб “Харківський родничок”, заварні пряники “Харківські”, вівсяне печиво “Козак”, сирковий десерт “Слоненя”, котлети “Ситні”, біфштекси з яловичини “Слобожанський”, формовий желейний мармелад “Ранок” на агарі та “Веселка” на пектині, біло-рожевий зефір “Весна” на агарі та “Літо” на пектині, ягідно-фруктові збиті десерти: мус “Малинка” та самбук “Ягідка”. Основними предметами, комплекс показників яких вивчався на різних етапах роботи, є:

– модельні системи заданого складу: *суспензії* наночастинок “Магнетофуд” (НЧМ) на 3 % *водному розчині*: HCl, VE пектину, агару, крохмалю, олеату натрію, яєчного білку; на 10 % *водному розчині* яєчного білку; *жиро-магнетофудові суспензії* (як жири використовували свинячий, яловичий, саломас нерафінований для маргаринової промисловості, замінник

молочного жиру “Віолія – молжир 3”, кондитерський жир “Шортенінг“ та олії: соняшникову рафіновану дезодоровану, кукурудзяну нерафіновану, соєву нерафіновану, маслинову нерафіновану; лінолеву кислоту); модельні системи: “крохмаль+магнетофуд”, “житнє-пшеничне борошно (60:40)+магнетофуд”; системи, що моделюють за своїм складом збивні маси: “яєчний білок+магнетофуд”, “яєчний білок+пектин (або агар)+магнетофуд”; мармеладні та зефірні маси з НЧМ;

– напівфабрикати: фарші для м’ясних посічених виробів; мармеладні та зефірні маси; тісто із суміші житнього та пшеничного борошна, а також із суміші вівсяного та пшеничного борошна як контрольні зразки і з введенням харчової добавки “Магнетофуд” (ХДМ) як дослідні зразки; жирова суспензія ХДМ (співвідношення компонентів ХДМ:соняшникова олія=50 мас.:%:50 мас.:%); водна суспензія ХДМ (співвідношення компонентів – гелеутворювач:вода:ХДМ=5 мас.:% : 90 мас.:%: 5 мас.:%);

– готові вироби: харчова добавка “Магнетофуд” (ХДМ), котлети і біфштекси з м’яса яловичини, десерт із сиру кисломолочного, хліб житньо-пшеничний, пряники заварні, вівсяне печиво, формовий желейний мармелад (на пектині й агарі), біло-рожевий зефір (на пектині й агарі), збиті десерти (ягідно-фруктовий мус і самбук), виготовлені за традиційною рецептурою, як контрольні зразки і з додаванням ХДМ – як дослідні зразки.

Характеристику предметів дослідження з конкретизацією підприємств-виробників та документів, які регламентують їх показники якості і безпечності, наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Характеристика предметів та матеріалів дослідження

Найменування сировини	Нормативна документація, якій повинна відповідати сировина
1	2
Борошно пшеничне 1 та вищого гат.	ДСТУ 46.004-99 [270]
Борошно житнє обдирне та сіяне	ГОСТ 7045-90 [271]
Борошно вівсяне	ГОСТ 31645-2012 [272]
Харчова добавка «Магнетофуд»	ТУ У 10.8-202.3017824-001:2018 [273]
Дріжджі хлібопекарські пресовані	ДСТУ 4812:2007 [274]
Сіль кухонна харчова	ДСТУ 3583:2015 [275]
Цукор-білий	ДСТУ 4623:2006 [276]
Мед натуральний	ДСТУ 4497:2005 [277]

Продовження таблиці 2.1

1	2
Маргарин	ДСТУ 4465:2005 [278]
Меланж	ДСТУ 8719:2017 [279]
Сода харчова	ГОСТ 2156-76 [280]
Вуглекислий амоній	ГОСТ 9325-79 [281]
Кориця	ГОСТ 29049-91 [282]
Масло вершкове несолене	ДСТУ 4399:2005 [283]
Вода питна	ДСТУ 7525:2014; ДСаНПіН 2.24-171 [284]
Вода дистильована	ГОСТ 6709-72 [285]
Ізюм	ГОСТ 6882-88 [286]
Цукор ванільний	ДСТУ 1009:2005 [287]
Сир кисломолочний 15%-ної жирності	ДСТУ 4554:2006 [288]
Сметана 20%-ної жирності	ДСТУ 4418:2005 [289]
Малина	ДСТУ 7179:2010 [290]
Чорна смородина	ДСТУ 8319:2015 [291]
Журавлина	ДСТУ 5035:2008 [292]
Яблуко	ДСТУ 7075: 2009 [292]
Желатина	ГОСТ 11293-89 [293]
Полуниця	ДСТУ 7653:2014 [294]
Слива	ГОСТ 21920-2015 [295]
Яєчний білок	ДСТУ 8719:2017 [296]
Білок яєчний сухий знецукрений (альбумін, компанія «Ovostar»)	Сертифікат аналізу; ТУ У 15.8-32086437-001:2007
Яловичина жилована 1-го гатунку, (котлетне м'ясо)	ДСТУ 4589:2006 [297]
Хліб пшеничний	ДСТУ 7517:2014 [298]
Молоко коров'яче питне	ДСТУ 2661:2010 [299]
Панірувальна суміш	ДСТУ 8708:2017 [300]
Жир кулінарний	ДСТУ 4463:2005 [301]
Перець чорний молотий	ДСТУ ISO 959-1:2008 [302]
Шпик	ДСТУ 4424:2005 [303]
Патока крохмальна	ДСТУ 4498:2005 [304]
Агар харчовий	ГОСТ 16280-2002 [305]
Пектин яблучний	ДСТУ 6088:2009 [306]
Кислота лимонна моногідрат харчова	ДСТУ ГОСТ 908:2006 [307]
Лактат натрію харчовий	ГОСТ 31642-2012 [308]
Есенції різні	ДСТУ 4716:2007 [309]
Барвники різні	ДСТУ 3845-99 [310]
Кислота молочна харчова	ДСТУ 4621:2006 [311]
Олеат натрію	Сертифікат аналізу
Білок яєчний сухий	ДСТУ 8719:2017 [279]

Продовження таблиці 2.1

1	2
Кислота хлоридна	ДСТУ 2904-94 (ГОСТ 857-95) [312]
Кислота лінолева	Сертифікат аналізу
Олія маслинова не рафінована	ДСТУ 5065:2008 [313]
Олія соєва не рафінована	ДСТУ 4534:2006 [314]
Олія кукурудзяна не рафінована	ДСТУ ГОСТ 8808:2003 [315]
Олія соняшникова рафінована дезодорована	ДСТУ 4492:2005 [316]
Кондитерський жир “Шортенінг“	Сертифікат аналізу; ТУ У 15.4 – 00373758:022 – 2006
Замінник молочного жиру “Віолія – молжир 3”	Сертифікат аналізу; ТУ У 15.4 – 00373758 – 013 – 2003
Жир топлений яловичий	ГОСТ 25292-2017 [317]
Жир топлений свинячий	ГОСТ 25292-2017 [317]
Саломас нерафінований	ДСТУ 5040:2008 [318]

Особливості одержання модельних систем. Суспензію харчової добавки “Магнетофуд” (ХДМ) у воді одержували шляхом диспергування наважки ХДМ у воді питній деаерованій та демінералізованій за температури 18...20°C протягом (5...7)×60 с з наступним витриманням протягом (10..12)×60 с [262].

Суспензію ХДМ у розчині HCl одержували шляхом введення розрахункової кількості ХДМ у 3 %-й розчин HCl за температури (30...40)°C за постійного перемішування $n=(2,0...2,2) \text{ с}^{-1}$ протягом (40...50)×60 с з наступним охолодженням суміші до температури 18...20°C і витриманням протягом (10..12)×60 с [262].

Суспензію ХДМ у (1%; 3% та 10 %) розчинах яєчного білка одержували шляхом введення розрахункової кількості ХДМ у 1% (або 3% або 10%) розчин яєчного білка за температури (18...20)°C за постійного перемішування $n=(2,0...2,2) \text{ с}^{-1}$ протягом (3...5)×60 с з наступним витриманням протягом (5..7)×60 с [263].

Суспензію ХДМ у (0,05% та 3%) розчинах VE пектину, агару, крохмалю, олеату натрію одержували шляхом введення наважки ХДМ у 0,05% (або 3%)-й розчин полісахариду або натрій олеату за температури (55...60)°C за постійного перемішування $n=(2,0...2,2) \text{ с}^{-1}$ протягом (5...7)×60 с з наступним

охолодженням суміші до температури (18...20)°C за постійного перемішування $n=(2,0...2,2) \text{ c}^{-1}$ [262].

Жирові суспензії (ЖС) ХДМ отримували пептизацією розрахункової кількості ХДМ в олію за температури (45...50)°C або в жир за температури плавлення відповідної жирової сировини (раціональне співвідношення компонентів – ХДМ:жир = 50 мас.:%:50 мас.%; тобто, 2,5 г суспензії містить 1,25 г ХДМ) при ретельному перемішуванні ($n=2,0...2,2 \text{ c}^{-1}$) протягом (3...4)×60с з наступним охолодженням суміші до температури (18...20)°C за постійного перемішування $n=(2,0...2,2) \text{ c}^{-1}$ [264–269].

Водні суспензії (ВС) харчової добавки “Магнетофуд” (ХДМ) отримували введенням наважки ХДМ у 5%-й водний розчин гелеутворювача (желатина, ВЕ пектина, агара) (раціональне співвідношення компонентів – драглеутворювач:вода:ХДМ=5 мас.:%:90 мас.:%:5 мас.%; тобто, 1,3 г суспензії містить 0,065 г ХДМ). 5% розчини гелеутворювача одержували шляхом диспергування його наважки у кількості 5 г в 95 г води питної деаерованої та демінералізованої за температури (15...18)°C з подальшою експозицією протягом: (30...40)×60с для желатина; (25...30)×60с для агару; (35...40)×60с для пектину та з подальшим підігрівом суміші: до (60...65)°C для желатина; (95...100)°C для агара; (85...90)°C для пектина; та додаванням 5г порошку добавки й перемішуванням суміші ($n= 2,0...2,2 \text{ c}^{-1}$) протягом (2...3)×60с з наступним охолодженням суміші до температури (18...20)°C за постійного перемішування $n=(2,0...2,2) \text{ c}^{-1}$ [262].

Системи “яєчний білок+пектин (або агар, або желатин)+магнетофуд” одержували шляхом введення до розчинів пектину (або агару, або желатину) розрахункової кількості розчину яєчного білку та наважки ХДМ за температури (15...18)°C за постійного перемішування протягом (3...4)×60 с.

Зразки хлібобулочних, борошняних кондитерських, м'ясних посічених, пастильно-мармеладних виробів; сиркових та збитих ягідно-фруктових десертів одержували відповідно до розроблених рецептур.

2.3. Методи та методики дослідження сировини, напівфабрикатів; оцінки якості та безпечності харчової продукції

Відбір проб та підготовку зразків для дослідження здійснювали за ГОСТ 6441-2014 [319], ДСТУ 4333:2004 [320], ДСТУ 4437:2005 [321], ГОСТ 5904:2009

[322], ДСТУ 4683:2006 [323], ДСТУ 4582:2006 [324], ГОСТ 30390-95 [325], ДСТУ 4834:2007 [326], ДСТУ 7670:2014 [327], ГОСТ 26809.2–2014 [328], ГОСТ 26668-85 [329], ГОСТ 32190:2013 [330], ДСТУ ISO 5555:2003 [331].

Інша сировина та матеріали, які використовували під час проведення дослідження, за показниками якості та безпечності відповідали вимогам нормативної документації та сертифікатам відповідності фірм-виробників, що дозволені до використання МОЗ та Держпродспоживслужбою України в харчовій продукції. У роботі застосовані сучасні стандартні фізичні, хімічні, фізико-хімічні, біохімічні, мікробіологічні й органолептичні методи аналізу сировини, напівфабрикатів і готових продуктів, а також модифіковані і вдосконалені методики, що відповідають меті дослідження, перелік яких подано у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Методи дослідження, оцінки якості та безпечності харчової сировини, напівфабрикатів, харчової продукції

Показники	Найменування методу, особливості
1	2
<i>Методи визначення фізико-хімічних та технологічних показників модельних систем, напівфабрикатів та готової продукції</i>	
Хімічний склад ХДМ (Fe_3O_4): визначення масових часток катіонів феруму $\omega_{\text{Fe}^{2+}}$ та $\omega_{\text{Fe}^{3+}}$ [332–334]	Спектрофотометричний метод, який проводили у два етапи: переведення частинок ХДМ у розчинну форму та фотометричне визначення масових часток катіонів ферума ($\omega_{\text{Fe}^{2+}}$ і $\omega_{\text{Fe}^{3+}}$) у розчині за допомогою сульфосаліцилової кислоти на спектрофотометрі КФК-2 (довжина кювети 1 см): $\omega_{\text{Fe}^{3+}}$ при $\lambda = 500$ нм і рН=5...6; $\omega_{\text{Fe}^{2+}}$ при $\lambda = 425$ нм і рН=7...8. $\omega_{\text{Fe}^{2+}}$ і $\omega_{\text{Fe}^{3+}}$ визначали за методом градувальних графіків.
Хімічний склад ХДМ (Fe_3O_4): визначення масової частки ферума загального $\omega_{(\text{Fe})}$ [334–336]	<i>Рентгенофлуоресцентний аналіз</i> проводили на кристал-дифракційному сканувальному аналізаторі “Спектроскан”: близько 0,025 г ХДМ вміщували у вимірювальну кювету аналізатора та визначали інтенсивність характеристичного випромінювання зразка в геометрії під кутом 45° зверху-вниз у діапазоні довжини хвиль від 950 мÅ до 3150 мÅ. Реєстрували кванти у діапазоні (2÷25) кеВ. Вагові частки феруму розраховували за допомогою програми аналітичного комплексу “Quan X”. Перерахунок масової частки ферума $\omega_{(\text{Fe})}$ % на масову частку ХДМ проводили за формулою: $\omega_{(\text{Fe}_3\text{O}_4)}\% = 1,37 \omega_{(\text{Fe})}\%$

Продовження таблиці 2.2

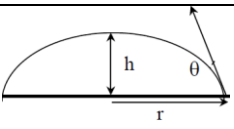
1	2
	<i>Методом атомно-абсорбційної спектроскопії</i> на спектрофотометрі “Сатурн” з атомізацією в повітряно-ацетиленовому полум’ї за наступних умов: тиск –0,2 МПа, температура полум’я–2523 К, довжина хвилі для Fe – 248,3 нм.
Хімічний склад ХДМ (Fe ₃ O ₄): визначення масових часток парамагнітних катіонів феруму $\omega_{\text{Fe}^{2+}}$ та $\omega_{\text{Fe}^{3+}}$ [337–339]	Метод електронного парамагнітного резонансу. Реєстрацію ЕПР-спектрів зразків ХДМ проводили за допомогою спектрометра ЕПР JESME-3x (JEOL) з частотою 9,4 ГГц. Умови реєстрації: підсилення 90, модуляція 0,8 кА/м, струм 0,5 мА, температура 293 К, вміст кварцової ампули 0,1 см ³ , довжина хвилі 3,2 см. Двократне інтегрування спектрів визначає площу під контуром поглинання, яка пропорційна масовій частці парамагнітних центрів – $\omega_{\text{Fe}^{2+}}$ та $\omega_{\text{Fe}^{3+}}$ у зразку
Хімічний склад НЧМ, покритих олією, білком, полісахаридом або після дії HCl [340, 341]	Метод енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDX) на скануювальному електронному мікроскопі JSM-820 (JEOL) з приставкою EDX. за бомбардуванням дослідних зразків електронами з використанням напруги прискорення 0,3...0,9 та 20 кеВ.
Розмір частинок ХДМ [267, 334, 340, 342]	Метод просвічальної електронної мікроскопії на трансмісійному електронному мікроскопі (ТЕМ) JSM-820 (JEOL) з можливістю збільшення до 150000 разів. Зразки готували методом суспензій (частинки ХДМ у суспензії розганялись за допомогою ультразвукового диспергатора УЗДА $\nu=35$ кГц, $t \sim 20 \times 60$ с). Як підложку використовували плівки, які одержували шляхом розтікання краплі суспензії наночастинок у розчині амілацетату на поверхні води. ТЕМ-знімки обробляли за допомогою програм AutoCAD 2014 та MathCAD 2014. Число частинок у виборці для визначення середніх діаметрів та розподілу за діаметром було не менш 500.
Термостабільність ХДМ [340, 343, 344]	Термографічні визначення зразків (масою \square 5,0 мг) проводили на дериватографі системи Q-1500D фірми MOM (Угорщина) у інтервалі температур від 20°C до 900°C зі швидкістю нагріву 5°C/60 с. Як стандартний зразок використовували Al ₂ O ₃ (T _{прож.} =1200°C).
Кристалічна структура ХДМ [334, 340, 345, 346]	Рентгенофазовий аналіз виконували на порошковому дифрактометрі Siemens D500 (Німеччина) у мідному випромінюванні з графітовим монохроматором за відомою методикою Брегга-Брентона. Пробу висушивали при $t=(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ до масової частки вологи $\omega=(10 \pm 0,5)\%$; ретельно розтирали та перемішували у ступці; 0,5 см ³ переносили у скляну кювету з робочим

1	2
	<p>об'ємом $2 \times 1 \times 0,1 \text{ мм}^3$ для реєстрації дифрактограм в інтервалі кутів $10^\circ < 2\theta < 150^\circ$ з шагом $0,02^\circ$ та часом накопичення 12 с у кожній точці. Первинний пошук фаз виконували за картотекою PDF-4, після чого проводили розрахунки рентгенограми за методом Рітвельда. За рівнянням Шеррера визначали середній діаметр НЧМ (Fe_3O_4): $L = 0,9 \times \lambda / V \times \cos\theta$, де L – розмір наночастинки Fe_3O_4, V – напівширина на напіввисоті піку, θ – кут, відповідний дифракційному максимуму при 2θ, λ – довжина хвилі рентгенівського випромінювання.</p>
Магнітні властивості ХДМ [347, 348]	<p>Намагнічування ХДМ визначали мостовим методом. Петлі магнітного гістерезису при $T = 300\text{K}$ на частоті 228 Гц шляхом висмикування дослідних зразків в ампулі із зони постійного магнітного поля</p>
Визначення рН, активної та титрованої кислотності водних розчинів [349, 350–352]; рН харчових систем [350, 352]	<p>Іонометричний методом вимірювання мілівольтметром-іонометром ЕРС гальванічного ланцюга, що включає спеціальний скляний електрод, потенціал якого залежить від концентрації іонів H^+ в навколишньому розчині.</p> <p>Значення рН харчових систем вимірювали за стандартною методикою (ДСТУ 6045), шляхом занурення електродів рН-метра іономера у суміш, підготовлену за температури $t = 20 \pm 1^\circ\text{C}$. Результат одержували шляхом середньоарифметичного обчислювання двох паралельних вимірювань за $P = 0,05$. Активну кислотність розчинів визначали за допомогою іонометра І 130 з електродною системою для вимірювання рН.</p>
Седиментаційна та агрегативна стійкість водних суспензій ХДМ [353, 354]	<p>Методом Фігуровського з використанням торсійних ваг визначали криві седиментації, розподіл частинок дисперсної фази за розміром, $S_{\text{сед}}$ та КСС.</p>
Електрокінетичний потенціал $\xi = (\eta \cdot U_0) / \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E$ водних суспензій ХДМ [262, 353]	<p>Макроелектрофорезом (методом рухомої межі) в скляній трьохколонній ємкості із градуювальними трубками. ξ-потенціал розраховували за рівнянням: $\xi = (\eta \cdot U_0) / \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E$, де: η – в'язкість дисперсійного середовища, Па·с; U_0/E – електрофоретична рухомість – відношення швидкості руху дисперсної фази (U_0) до одиниці напруженості електричного поля (E); ε – діелектрична проникність середовища, Ф/м; ε_0 – діелектрична стала ($8,854 \times 10^{-12}$ Ф/м).</p>

Продовження таблиці 2.2

1	2
<p>Стойкість та дисперсність жирових суспензій ХДМ [354, 267–269, 355, 356]</p>	<p>Визначенням спектрів послаблення суспензій з НЧМ (концентрація 4,85...38,9 мг/л, розчинник етанол або ізооктан) у режимі вимірювання спектра 210...700 нм і кінетичних вимірювань $\lambda=600$ нм при тривалості окремого експерименту 100×60 с. Коефіцієнт мутності (Т) ЖС визначали шляхом вимірювання відношення повного світлового потоку (F_0^λ) та світлового потоку, що пройшов через середовище (F^λ) за формулою: $T=(F^\lambda/F_0^\lambda) \times 100$. Визначали час седиментації ЖС t_{sed}, середній ефективний радіус частинок $r_{\text{ср.еф}}$ та розподіл частинок за діаметром.</p> <p><i>Стабільність суспензій</i> на основі твердої жирової сировини оцінювали за методом Стокса. Швидкість осадження частинок дисперсної фази (U) визначали за рівнянням: $U=2r^2(\rho-\rho_0) \times g/9\eta$, де: r – радіус (розмір) частинок дисперсної фази, см; ρ, ρ_0 – густина дисперсної фази та дисперсійного середовища, г/см³; η – динамічна в'язкість дисперсійного середовища, Па·с.</p>
<p>ІЧ-спектроскопічні дослідження ХДМ та НЧМ, покритих органічними речовинами [340, 354, 341, 356–359, 360]</p>	<p>ІЧ-Фур'є спектри знімали у діапазоні 400-4000 см⁻¹ (для твердофазних матеріалів – таблетки KBr зі змістом досліджуваної речовини 2мг на 100г, для рідких – рідина, поміщена між пластинками KBr) на приладі ІЧ-фур'є спектрометрі SPECTRUM ONE фірми PerkinElmer.</p>
<p>Поверхнево-активні властивості ХДМ [263, 361]</p>	<p>Величину поверхневого натягу визначали за методом Дю-Нуї на тензіометрі Kruss в 0,01% модельних розчинах у полярних та неполярних розчинниках. Коефіцієнт поверхневого натягу (σ, Н/м) розраховували за рівнянням: $\sigma=F/2\pi d$, де d – діаметр кільця, м, F – сила відриву кільця від поверхні рідини, Н.</p>
<p>Амфіфільність ХДМ [362]</p>	<p>Методом «миттєвої зйомки» визначали крайові кути змочування краплями оліє-водної сировини платформи ХДМ за допомогою приладу для вимірювання контактного кута рідини серії АСАМ (Росія). Визначали форму краплин під час їх проектування на екран приладу та фотографування форми краплин (5...10 шт.). Розраховували крайові кути змочування за такою формулою:</p>

Продовження таблиці 2.2

1	2
	 $\cos \theta = \frac{r^2 - h^2}{r^2 + h^2}$ <p>де θ – крайовий кут змочування,°; h – висота краплини, м; r – радіус кола основи краплини, м.</p>
Товщина приповерхневого шару ХДМ [334, 363]	Авторська методика «стравлювання шару» під дією кислого середовища з подальшим визначенням масових часток феруму: ωFe^{3+} або $\omega\text{Fe}_{(\text{зар.})}$ в розчині спектрофотометричним та атомно-абсорбційним методами відповідно.
Визначення кислотного числа (КЧ) жиру та жировмісних продуктів [364]	КЧ визначали за допомогою реакції нейтралізації вільних жирних кислот розчином лугу в спиртово-ефірному розчині жиру та виражали кількістю міліграм гідроксиду калію (КОН), що пішло на нейтралізацію вільних жирних кислот, які містяться в 1,0 г жиру. Сутність методу полягає у розчиненні необхідної маси зразку в суміші розчинників із подальшим титруванням наявних вільних жирних кислот водним або спиртовим розчином КОН чи NaOH. Показник КЧ олії (X_1), мг КОН/г, визначали за формулою: $X_1 = (5,611 \times K \times V) / m$, де 5,611 – коефіцієнт, який дорівнює значенню розрахункової маси КОН в 1 мл 0,1 н розчину КОН; K – поправка до титру 0,1н розчину КОН; V – об'єм 0,1 н КОН, витраченого на титрування, мл; m – маса олії соняшникової, г.
Визначення пероксидного числа (ПЧ) жиру та жировмісних продуктів [365]	ПЧ визначали шляхом розчинення зразків у суміші розчинників з подальшим титруванням наявних гідропероксидів розчином $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$. ПЧ (ммоль/кг) за формулою: $X = (V - V_0) \times 1000 \times C / m$, де V – об'єм розчину $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ в основному досліді, cm^3 ; V_0 – об'єм розчину $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ в контрольному досліді, cm^3 ; C – концентрація розчину $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, моль/ dm^3 ; m – маса проби, г.
Визначення йодного числа (ЙЧ) жиру та жировмісних продуктів [366]	ЙЧ визначали методом Кауфмана, відповідно до якого ЙЧ визначають за формулою: $\text{ЙЧ} = [1,269 \times (a - b) \times K] / m$, де a і b – об'єм розчину $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, витраченого на титрування, cm^3 ; 0,01269 – титр розчину тіосульфату натрію, г/ cm^3 ; K – коефіцієнт перерахунку; m – маса наважки, г; 100 – коефіцієнт для перерахунку, %.
Емульгуюча ємність ХДМ в емульсії «вода+олія» [367, 368]	Визначали шляхом виявлення точки інверсії фаз за методом Гурової М.Н. Емульгування здійснювали на лабораторному емульсаторі зі швидкістю обертів валу емульсатора 50s^{-1} . Для цього у хімічну склянку місткістю 100cm^3 уміщували дослідний

1	2
	зразок об'ємом 10 см ³ , а потім, за допомогою лійки для розподілу додавали олію зі швидкістю 78...80 крапель/60 с до інверсії фаз. Тип емульсії виявляли методом розбавлення. Об'єм олії, що вилився з лійки, відповідав значенню точки інверсії фаз.
Стійкість емульсій «вода+олія+НЧМ» [80]	Визначали, фіксуючи об'єми фаз, які відділилися після центрифугування зі швидкістю обертання ротора 25 с ⁻¹ протягом 5×60 с. Після зразок поміщали на водяну баню за температури 80...85°С, витримували 3×60 с та знову центрифугували протягом 5×60 с. На основі одержаних даних будували діаграми стійкості. На діаграмі на осі абсцис відкладали об'єм жирової фази (у %), а на осі ординат, ліворуч і праворуч, відповідно, об'єм жирової та водної фаз, що відділилися при центрифугуванні. Лінії, проведені через точки, що були отримані під час експерименту, обмежують область фаз, які відділились (жирової та водної) і область незруйнованої емульсії. Величину <i>кінетичної</i> стійкості емульсії визначали як співвідношення об'єму води, що відділилася після центрифугування, до загального об'єму емульсії за формулою: $C_{\text{кін.}} = (V_{\text{в.ф.}}/V_{\text{ем.}}) \times 100\%$, де $C_{\text{кін.}}$ —кінетична стійкість емульсій, %; $V_{\text{в.ф.}}$ —об'єм водної фази, що відділилася, см ³ ; $V_{\text{ем.}}$ —об'єм емульсії, см ³ . <i>Агрегативну</i> стійкість емульсії визначали як відношення об'єму олії, що відділилася після центрифугування, до загального об'єму емульсії за формулою: $C_{\text{агр.}} = (V_{\text{ж.ф.}}/V_{\text{ем.}}) \times 100\%$, де $C_{\text{агр.}}$ —агрегативна стійкість емульсій, %; $V_{\text{ж.ф.}}$ —об'єм жирової фази, що відділилася, см ³ ; $V_{\text{ем.}}$ —об'єм емульсії, см ³ .
Масова частка вологи [369–375]	Термогравіметричний метод висушування наважці до постійної ваги при постійній температурі.
<i>Дослідження функціонально-технологічних властивостей модельних систем, напівфабрикатів та готової продукції</i>	
Коефіцієнт водопоглинання (ступінь сольватації) ХДМ [376]	Використовували прилад Догадкіна, який дозволяє визначати ступінь набрякання (сольватації) порошкоподібної сировини в середовищах, що традиційно прийнято в харчових технологіях. Ступінь сольватації (Q) визначали за рівнянням: $Q = (M_{\text{в.}}/M_{\text{с.}}) \times 100\% = [(pV + V_{\text{с.}})/M_{\text{с.}}] \times 100\%$, де $M_{\text{с.}}$ — маса до сольватації, г; $M_{\text{в.}}$ — маса після сольватації, г; V —об'єм поглинутої рідини, см ³ ($V = 2 \times Dh \times K_{\text{п}}$); h — висота стовпа поглиненої рідини, см; D — діаметр трубки, см; $K_{\text{п}}$ — коефіцієнт приладу
Коефіцієнт набухання (сольватації $K_{\text{с}}$) ХДМ [353, 377]	Об'ємний метод визначення коефіцієнта набухання (сольватації – $K_{\text{с}}$) ґрунтується на зміні об'єму наважки порошку після заливання його розчинником на певний період часу за рівнянням:

1	2
	$K_c = (V_1 - V_0) / V$, де V_0 , V_1 – об'єми системи відповідно до і після сольватації, cm^3
Водопоглинальна здатність (ВПЗ) ХДМ [378, 379]	Методика, заснована на зв'язуванні води за $T=293K$ та різним гідромодулем з подальшим центрифугуванням і визначенням ВПЗ стандартним ваговим способом за формулою $\alpha_m = (m - m_0) / m_0$, де m_0 та m – наважка ХДМ до і після сольватації, α_m – ВПЗ.
Набухаємість (cm^3/g) модельних систем «житньо-пшеничне борошно+магнетофуд», «крохмаль+магнетофуд» [380–382]	Визначали настоюванням 1%-ної водної суспензії протягом доби та оцінюванням як максимальної кількості води, яку об'єкт може поглинути і утримати до настання динамічної рівноваги, віднесено до маси наважки.
Вологоутримувальна здатність (ВУЗ, %) ХДМ та порошкової сировини [382, 383]	Визначали методом Шоха як кількість води, що адсорбована й утримана сировинним компонентом в процесі настоювання і центрифугування водної суспензії. Кількість зв'язаної води – W (в г) визначали зважуванням пробірки разом з осадом за вирахуванням маси порожньої пробірки. ВУЗ (в %) визначали відношенням кількості зв'язаної води W до маси наважки.
Піноутворювальна здатність (ПЗ) рецептурних сумішей та модельних систем [384]	Визначали методом Лур'є, де величину розраховували за формулою $ПЗ = (V_{п} / V_{д}) \cdot 100\%$, де $V_{п}$ – об'єм піни, m^3 ; $V_{д}$ – об'єм зразка до збивання, m^3 .
Масова частка зв'язаної та вільної вологи (гідрофільність) ХДМ та дослідними зразками [385–392]	<p>Визначали <i>індикаторним рефрактометричним методом</i>, суть якого полягає у визначенні різниці в СР між розчинами цукру і сольватованої ХДМ в цукровому розчині. Початкову й рівноважну концентрацію розчину «індикатора» цукру визначали рефрактометром. <i>Зв'язану вологу</i> визначали за формулою: $X = V \cdot (b_2 - b_1) / P \cdot b_2$, де X – кількість зв'язаної води, г на 1 г сухої речовини (СР); b_1 і b_2 – початкова і кінцева концентрації розчину сахарози, %; V – маса 20 cm^3 10% розчину сахарози, г; P – наважку сухої речовини (СР), г. <i>Вільну вологу</i> – за формулою: $Y = (C_0 - C_1) \cdot m \cdot 100 / C_1 \cdot g \cdot W$, де Y – вміст вільної води, % від загального змісту; C_0 – початкова концентрація розчину сахарози, %; C_1 – кінцева концентрація розчину сахарози, %; m – маса вихідного розчину сахарози, г; g – наважка, г; W – загальний вміст води в 1 г зразка, г.</p> <p><i>Гідрофільність</i>, W, % розраховували за формулою: $W = (x/n) \cdot 100\%$, де x – загальна кількість зв'язаної води, г; n – маса сухої речовини, г.</p>

Продовження таблиці 2.2

1	2
	<p>тографі Q1500D, за допомогою якого можна визначити кількісні зміни в зразках, що супроводжуються зменшенням ваги внаслідок видалення вологи під час термічного впливу. За допомогою чотириканального реєструвального приладу дериватографа одночасно контролювали зміни температури (T), ваги (TG), швидкості зміни ваги (DTG) та температури (DTA) дослідних зразків залежно від часу в діапазоні температури (15...180)°C за неізотермічних умов. Дослідження здійснювали для маси наважки зразків 0,5 г за наступних режимів зняття дериватограм: чутливість гальванометра DTA – 250, гальванометра DTG – 500, гальванометра TG – 500, швидкість зміни температури нагрівання – 4°C/60 с. На основі кривої зміни TG, що відповідає процесу дегідратації, кривої температури T будували залежності ступеня зміни маси α від температури T. Для цього на кривій TG через кожні 5 °C знаходили зміну маси зразка, що відповідає масовій частці видаленої вологи за температури T, а також загальну масову частку вологи, яку визначили за кривою TG у кінці процесу кри-сталізації. Ступінь зміни маси α розраховували за формулою: $\alpha = \Delta m_T / m$, де α – ступінь зміни маси; Δm_T – зміна маси зразка за температури T, 10^{-3} г; m – загальна масова частка вологи, що міститься в зразку, 10^{-3} г.</p>
<p>Жирозв'язувальна здатність (ЖЗЗ) ХДМ [393, 394]</p>	<p>Наважку ХДМ масою 5 г змішували із 30 мл олії та поміщали у зважену центрифужну пробірку. Суміш перемішували ($n=16,7 \text{ с}^{-1}$), відстоювали 30×60с та центрифугували ($n=66,7 \text{ с}^{-1}$). Не адсорбовану олію зливали, пробірку залишали у нахиленому стані 10·60с для видалення залишків олії. ЖЗЗ визначали за формулою: $ЖЗЗ=(a-v)/c$, де a – вага пробірки з наважкою та зв'язаною олією, г; v – вага пробірки, г; c – вага наважки.</p>
<p>Вологоутримувальна здатність м'ясних фаршів (ВУЗ) [376]</p>	<p>Ваговий метод пресування в модифікації Крайнюк Л.М. зі співавторами. Величину вираховують за формулою: $ВУЗ=\{[100-(v-c)\times 100]/(a\times M)\}\times 100\%$, де a – вага наважки, г; v – вага фільтрувального паперу після пресування та зняття фаршу, г; c – вага фільтрувального паперу після пресування та висушування, г; M – масова частка вологи в наважці, %.</p>

Продовження таблиці 2.2

1	2
Гідратаційна здатність клейковини [374, 375, 395]	Визначали витримкою зразків сирової клейковини в термошафі при 20 °С протягом 72 годин з подальшим визначенням її маси. Масу сухої клейковини визначали після висушування сирової клейковини протягом 1 години при температурі 60...70°С та 2×60 ² с при температурі 120°С до постійної маси. Обчислювали гідратаційну здатність (ГЗ) за формулою: $ГЗ=100 \times (m_2 - m_1) / m_1$, де ГЗ – гідра-таційна здатність сирової клейковини, %; m_2 – маса сирової клейковини, г; m_1 – маса сухої клейковини, г.
Стабільність піни (СП) рецептурних сумішей та модельних систем [384]	СП визначали як відношення висоти стовпа піни до загальної висоти зразка, виражену у відсотках після витримання упродовж 1х60 ² с для піно-подібних систем, 24х60 ² с – для пенних систем. Формула для розрахунку СП: $СП=(V_n^{15}/V_n) \cdot 100\%$, де де СП – стійкість піни, %; V_n^{15} – висота піни після (15×60) с вистоювання, м; V^n – початкова висота піни, м.
Вміст та розтяжність сирової клейковини [396]	Досліджували ручним способом відповідно до ДСТУ ISO 21415-1: 2009.
Вихід продукції [369, 375, 380, 394, 397, 398]	Ваговим методом за загально визначеними методиками
Перетравність in vitro [399, 400]	Ферментативний гідроліз білків м'ясних посічених виробів визначали за методом А.А. Покровського та Є.Д. Єртанова. Про ступінь перетравлення білків зразків судили за різницею між кількістю білків, які витрачено на перетравлення, та кількістю білків, які залишилися після послідовного оброблення предметів дослідження пепсином і трипсином. Накопичення продуктів гідролізу визначали за кольоровою реакцією Лоурі та виражали в умовних одиницях (мг тирозину на 1 г білка) за формулою: $\rho=(10 \cdot П) / T$, де ρ – перетравність білка об'єкта, що досліджується, у % до масової частки тирозину; П – перетравність білка зразка, виражена у мг тирозину/1 г білка; Т – масова частка тирозину в білку досліджуваного об'єкта, г/100 г білка; 10 – коефіцієнт

Продовження таблиці 2.2

1	2
Здатність борошняних кондитерських виробів до намокання [401]	Здатність до намокання визначали відношенням маси борошняних кондитерських виробів після намокання до маси сухих виробів (у %) відповідно до ДСТУ 5023:2008
<i>Методи визначення структурно-механічних показників модельних систем, напівфабрикатів та готової продукції</i>	
Мікроскопічне визначення середнього діаметра жирових крапель, бульбашок повітря, а також оцінки дисперсності зразків сиру кисломолочного, біло-рожевого зефіру, збитих плодово-ягідних десертів (мусів та самбуків) [263, 402]	Здійснювали за допомогою мікроскопа «Біолам Р15» з цифровою камерою-окуляром ScoreTek DCM – 130 E 1.3Mr з одержанням фотографій за допомогою програмного засобу Score Photo 3.0. Оброблення даних мікрофотографій здійснювали автоматизовано за допомогою програмного засобу з відкритим вихідним кодом ImageJ 1.47. Оцінку мікроструктури зразків сиркового і збитих десертів, зефіру проводили за допомогою світлового мікроскопа з цифровою фотонасадкою за збільшення (x40) разів. Для приготування препаратів для мікроскопії в ступці до гомогенної маси розтирали середню пробу продукту. Потім 0,005 г препарату петлею рівномірно наносили на предметне скло і мікроскопіювали, випадково обираючи поля зору за всією поверхнею препарату для отримання об'єктивних, статистично достовірних результатів та фотографували.
Динамічна в'язкість водних суспензій «житньо-пшеничне борошно+магнетофуд», «крохмаль+магнетофуд» [403, 404]	Визначали на ротаційному віскозиметрі «Реотест-2» за формулою: $\eta = \tau / D$, де τ – напругу зсуву, Па; D – градієнт швидкості, с^{-1} . Напругу зсуву τ (Па) визначали за формулою: $\tau = Z \cdot \alpha$, де Z – константа циліндру, Па /од. шкали приладу; α – показники приладу.
Ефективна в'язкість, тиксотропні властивості модельних систем [403, 405]	<i>Ефективну в'язкість</i> дослідних зразків визначали на ротаційному віскозиметрі «Реотест-2» за формулою: $\eta = k \cdot U \cdot T \cdot A$, де η – ефективна в'язкість, Па·с; k – константа вимірювального вузла, Па/В; U – напруга, В; T – період обертання, с; A – коефіцієнт форми вимірювального вузла. Швидкість зсуву визначали за формулою: $\gamma = 1 / T \cdot A$, де γ – швидкість зсуву, с^{-1} . За отриманими даними будували криві течії $\eta = f(\gamma)$. <u>Коефіцієнт тиксотропії</u> (%) розраховували за формулою: $\lambda_m = (\eta_z / \eta_{п}) \cdot 100 \%$, де λ_m – коефіцієнт тиксотропії, %; η_z – значення в'язкості

1	2
	зворотного ходу, Па·с; η_p – значення в'язкості прямого ходу, Па·с. Для визначення коефіцієнта тиксотропії у формулу підставляють значення в'язкості з мінімальною, однаковою швидкістю зсуву.
Механічна міцність дослідних зразків [403, 404, 406]	Виражали через граничну напругу зсуву (σ_0 , Па), визначення якої проводили на автоматизованому пенетрометрі фірми Labor за температури 18...20°C, або за допомогою прибору Валента за ГОСТ 26185-94 (для драглів). А також на модифікованих вагах Каргіна-Соголової шляхом вивчення зусилля руйнування (в умовах одноосного стиснення). Для цього дослідний зразок поміщали на платформу, положення якої регулювали з метою приведення у дотичний стан зразку та пуансону, розважували ваги та фіксували граничне значення маси вантажу, що призводить до роздавлювання зразку. Зусилля руйнування визначали за формулою: $ZP=4m \cdot g / \pi \cdot d^2$, де ZP – зусилля руйнування, Па; m – маса вантажу, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с ² ; d – діаметр зразку, м.
Структурно-механічні властивості [403, 404]	<p>Структурно-механічні властивості дослідних зразків (зворотну та незворотну деформації, миттєвий модуль пружності, модуль еластичності, пластичну в'язкість) визначали за допомогою модифікованих вагів Каргіна-Соголової шляхом вивчення деформації стиснення зразка під дією пуансона з тефлоновою насадкою. Отримані дані виражали у вигляді кривих кінетики деформації:</p> <p>Відносну деформацію розраховували за формулою: $\epsilon = z \cdot n / h$, де ϵ – деформація; z – ціна поділок мікроскопу $z=10^{-3}$ м; n – кількість поділок у шкалі мікроскопу; h – висота зразка, м. За даними кривих відносної деформації визначали: – <u>миттєвий модуль пружності</u> за формулою:</p>

Продовження таблиці 2.2

1	2
	<p>$E_{пр} = m \cdot g / S \cdot \varepsilon_0$, де $E_{пр}$ – миттєвий модуль пружності, Па; ε_0 – умовно-миттєва деформація; m – маса вантажу, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²; S – площа перетину зразка, м²;</p> <p>– <u>модуль еластичності</u> за формулою: $E_{ел} = m \cdot g / \varepsilon_{ве}$, де $E_{ел}$ – модуль еластичності, Па; $\varepsilon_{ве}$ – високо-еластична деформація;</p> <p>– <u>пластичну в'язкість</u> за формулою: $\eta_{пл} = (t_2 - t_1) \cdot m \cdot g / S \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$, де $\eta_{пл}$ – пластична в'язкість, Па·с; $t_2 - t_1$ – тривалість вимірювання деформації, с; $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$ – зміна деформації стискування за інтервал часу $t_2 - t_1$.</p>
Гранична напруга зсуву (ГНЗ) [405]	Визначали на пенетрометрі Labor. ГНЗ незруйнованої структури σ_0 (Па) розраховували за формулою Ребіндера: $\sigma_0 = k \cdot (m \cdot g) / h^2$, де m – маса індентора і стрижня приладу, яка діє на дослідний зразок (за мінусом тертя і опору пружини індентора), кг; g – прискорення вільного падіння м/с ² ; h – глибина занурення конуса, м; k – константа індентора.
Структурно-механічні властивості тіста [407]	Структурно-механічні властивості тіста з використанням ХДМ досліджували за допомогою фарінографа Брабендера.
Адгезійна міцність [404, 407]	Дослідження адгезійної міцності харчових вузько-пластичних матеріалів, в т. ч. тіста, засновано на способі рівномірного відриву. При такому відриві величину адгезії визначають у момент одночасного порушення контакту на всіх ділянках площі контакту при положенні руйнівного навантаження в напрямку, перпендикулярному площині контакту поверхонь, за формулою $P_0 = P / F$, де P_0 – величина адгезії, Па; P – максимальна сила відриву, Н; F – площа пластини, м ² .
<i>Дослідження органолептичних показників</i>	
Органолептичні показники [369, 380, 394, 408–413]	Органолептичну оцінку якості ХДМ, харчової та кулінарної продукції з її використанням здійснювали аналітичними методами, методами профільного аналізу. Метод профільного аналізу полягає у використанні набору описових термінів для оцінювання окремих органолептичних показників продукту (запаху, консистенції, смаку тощо) за схемою: визначення характерних ознак показників, ступеня їх інтенсивності, порядку виявлення.

Продовження таблиці 2.2

1	2
<i>Дослідження показників якості та безпеки</i>	
Відбір проб для проведення мікробіологічних аналізів здійснювали згідно ГОСТ 26668 [329], підготовку зразків для мікробіологічного дослідження здійснювали згідно ГОСТ 26669 [414]. Мікробіологічні показники (МБП) визначали згідно ГОСТ [415–422]	МБП визначали: МАФМ – за ГОСТ 10444.15, бактерії групи кишкової палички – за ГОСТ 30518, <i>Staphylococcus aureus</i> – за ГОСТ 10444.2, патогенні мікроорганізми, зокрема бактерії роду <i>Salmonella</i> – за ДСТУ ISO 6579:2006, дріжджі та плісняві гриби – за ГОСТ 10444.12. Наявність бактерій визначали за ГОСТ 10444.15-94, ГОСТ 10444.8-88, ГОСТ 29185-91 та відповідно до «Методичних вказівок з санітарно-мікробіологічному контролю у закладах ресторанного господарства та торгівлі»
Підготовку проб для визначення токсичних елементів здійснювали за ГОСТ 26629 [423] Визначення токсичних елементів та солей важких металів (ТЕ та СВМ) здійснювали за ГОСТ [424–430]	ТЕ та СВМ у складі нової продукції визначали за ГОСТ 26927, ГОСТ 26928, ГОСТ 26930, ГОСТ 26931, ГОСТ 26932, ГОСТ 26933, ГОСТ 26934
Доклінічні випробування параметрів токсичності ХДМ на лабораторних тваринах [Додаток М.1]	Визначали гостру й підгостру токсичність; цитотоксичність та фармакінетичні характеристики ХДМ в умовах <i>in vitro</i> та <i>in vivo</i> на лабораторних тваринах – мишах та щурах обох статей
<i>Економічні показники</i>	
Конкурентоспроможність (КС _п) нової продукції [431–433]	Визначали за комплексним методом. КС _п нової продукції за п'ятьма показниками як функція двох абсолютних показників – вимірюваного та еталонного
Економічна ефективність та наукоємність [432, 433]	Визначали шляхом розрахунку джерел ефекту від реалізації нової продукції

Методи дослідження ФТВ ХДМ також відзначено в низці наших робіт [434–459]. Розробку рецептур, технологій ХДМ, кулінарної, борошняної та кондитерської продукції з використанням ХДМ, випуск дослідно-промислових партій здійснювали відповідно до методичних рекомендацій [460], а також керуючись ДСТУ 3946 «Система розроблення і поставлення продукції на виробництво. Продукція харчова. Основні положення».

Контроль відповідності показників безпеки ХДМ та розробленої харчової продукції з її використанням здійснювали за вимогами чинної нормативної документації [461–463].

2.4. Програмні засоби і комп'ютерні технології, статистична обробка отриманих даних, методи моделювання технологічних процесів та математичної обробки експериментальних даних

У межах дисертаційної роботи реалізовано методологію системного підходу, що дозволило об'єднати різноманітні методи дослідження воедино. Вивчення технологічних систем здійснювали із застосуванням декомпозиційно-агрегативного методу, що поєднує два взаємопов'язаних процеси – аналіз (декомпозиція) та синтез (агрегування). Поєднання системного аналізу та синтезу дозволило розв'язати проблему раціонального функціонування систем, підсистем, окремих елементів, установити взаємозв'язок між ними в рамках єдиної системи. Для прогнозування стану системи, що досліджувалася, в умовах оптимізації параметрів об'єкта використовували математичне моделювання, зокрема, кореляційно-регресійний аналіз; для об'єктивного судження про ступінь вірогідності одержаних даних проводили математичну обробку результатів дослідження; оцінку похибки експериментальних даних і вимірюваних величин здійснювали за методиками [464]. Під час обробки результатів експериментів використовували такі статистичні критерії: перевірка однорідності дисперсії – критерій Кохрена, значимість коефіцієнтів регресії – критерій Стьюдента, адекватність рівнянь – критерій Фішера. Обробку результатів дослідження здійснювали за допомогою програмного засобу Microsoft Excel 2013, MathCAD.

Висновки за розділом 2

1. В основу методології дисертаційної роботи покладено аспектний, системний та концептуальний підходи, які реалізовано в програмі теоретичних та експериментальних досліджень. Поетапний механізм поширення інновацій дозволив підпорядкувати єдиній меті взаємозалежні

складові системи – логічний та формальний аналіз, логічний та формальний синтез, оцінку ефективності функціонування системи. Досягнення мети дослідження забезпечено синхронізацією циклу: фундаментальні дослідження – прикладні розробки – комерціалізація.

2. Розроблено методику спектрофотометричного визначення кількості НЧ та їх концентрації у жирових суспензіях, а також стійкості жирових суспензій з НЧМ. Запропоновано методику «стравлювання шару» НЧМ під дією кислого середовища з подальшим визначенням ωFe^{3+} або $\omega\text{Fe}_{(\text{заг.})}$ в розчині спектрофотометричним та атомно-абсорбційним методами.

3. Визначено та описано методи експериментальних досліджень функціонально-технологічних властивостей модельних систем; показників якості та безпечності напівфабрикатів; хлібобулочної, борошняної й збивної кондитерської, м'ясної посіченої, пастильно-мармеладної, кисломолочної продукції, одержаної шляхом реалізації потенціалу ХДМ.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНЕ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ НАНОЧАСТИНОК МІНЕРАЛЬНОГО ПОХОДЖЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЯХ ХАРЧОВОЇ ПРОДУКЦІЇ

У цьому розділі висвітлено потенціал наночастинок мінерального походження (зокрема, подвійного оксиду дво- та тривалентного заліза), обґрунтування й визначення раціональних параметрів та режимів виробництва харчової добавки на основі оксидів заліза зі сталими фізико-хімічними показниками та показниками безпеки для формування функціонально-технологічних властивостей харчової нанодобавки.

3.1. Теоретичне обґрунтування потенціалу наночастинок мінерального походження (зокрема подвійного оксиду дво- та тривалентного заліза)

Сировинним інгредієнтам мінерального походження притаманні сталі фізико-хімічні показники, певні функціонально-технологічні властивості (ФТВ), що є потенціалом для включення їх в технологічний процес виробництва харчової продукції. Фізико-хімічні показники (ФХП) наночастинок (НЧ) визначаються багатьма чинниками: природою та хімічним складом; характером взаємодії між складовими елементами наноструктури; типом кристалічної решітки та ступенем дефектності; анізотропією; розміром і формою частинок; морфологією частинок, особливо для частинок з комплексною структурою; товщиною і структурою приповерхневого шару, взаємодією частинок з навколишньою матрицею і сусідніми частинками та молекулами [2, 32–35]. НЧ мінерального походження характеризуються певними фізико-хімічними показниками (ФХП): молекулярною масою; наявністю полярних іонів; значенням ізоелектричної точки; деякими оптичними, магнітними властивостями; показником заломлення; спектроскопічними характеристиками.

Ці ФХП мінеральних НЧ проявляються в тому, що вони мають певні характеристики, які можна оцінити, як здатність НЧ-речовини виконувати ту чи іншу функцію в технологічному процесі: бути аніоном, катіоном або знаходитися в ізоелектричній точці, тобто структурувати або стабілізувати; уповільнювати або прискорювати виробничі процеси під впливом технологічних чинників. У загальному вигляді ФТВ НЧ певного хімічного складу залежать від комплексу її ФХП, які зумовлюють поведінку НЧ у водних середовищах (набухання, розчинність, гідратація, гелеутворення і т.д.), у гетерогенних середовищах типу «вода-масло» і «масло-вода» (емульгувальна і стабілізувальна здатність) або «вода-газ» (піноутворювальна і піностабілізувальна здатність). ФТВ наночастинок мінерального походження проявляються в залежності від їх природи і характеру взаємодії з іншими компонентами даної харчової системи, залежать від дисперсності, структури, стану і можуть бути скориговані параметрами технологічного процесу (значенням рН; температурою; ступенем гідратації; наявністю іонної сили, магнітного поля і ін.), фізичним впливом (тиском, перемішуванням, емульгуванням, збиванням), хімічним впливом або модифікацією [267–269, 342, 465, 466].

У нашому випадку використовуємо НЧ подвійного оксиду заліза $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ або Fe_3O_4 . У природі такий хімічний склад має широко розповсюджений гірничорудний мінерал магнетит Fe_3O_4 (родовища на Західній Україні), який має невисоку собівартість (~100 грн/кг)[44]. Щоправда, природний магнетит завжди має домішки, зокрема Ti , Al , Mg та Mn , що перешкоджає його безпосередньому застосуванню в технологіях продуктів харчування; тому використовується він як технічний.

Відомо, що НЧ оксидної природи, типу Fe_3O_4 , характеризуються наявністю полярного зв'язку $^{+\delta}\text{Fe}-\text{O}^{\delta-}$ й утворенням структуроутворюючих катіонів Fe^{2+} і Fe^{3+} та виникненням на поверхні різнойменно заряджених ділянок (“+”Fe) і (“-”O) [46, 260, 261].

Також наночастинки Fe_3O_4 притаманні магнітні характеристики, які сприяють посиленню поверхневої хімічної активності. Це формує потенціал наночастинок Fe_3O_4 , який досліджували багато авторів [45, 259–261, 343, 467, 468]: колоїдність та сорбційні властивості (нанорозміри та велика питома

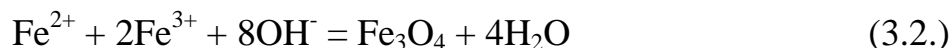
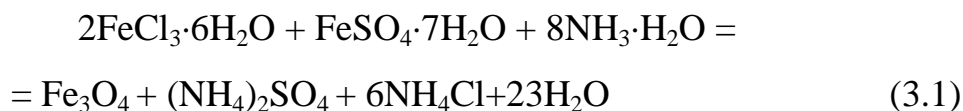
поверхня) [45, 46, 261]; хімічно активну поверхню [111, 260, 469]; схильність до електростатичних (знаходження на поверхні різнойменно поляризованих ділянок ($^{+\delta}\text{Fe}$) і ($\text{O}^{\delta-}$)) та координаційних (наявність на поверхні структуроутворювальних іонів Fe^{2+} і Fe^{3+} з вакантними 3d-орбіталями) взаємодій [45, 357, 358], магнітні властивості [467, 468]. Крім того, є докази біологічної сумісності Fe_3O_4 з живими організмами; низької токсичності $\text{LD}_{50}=10\text{г/кг}$, низького рівня мутагенної небезпечності, нездатності спричиняти негативні відповідні реакції організму при внутришньовенозному, внутришньоартеріальному, внутришньочеревинному та інших шляхах введення [470–472]. Однак численними дослідженнями з промислового використання НЧ Fe_3O_4 [24, 32–34, 259, 470] не були досягнуті необхідні ФТВ, що дозволяють застосовувати їх як покращувача харчової продукції з гетерогенною дисперсною структурою. Змінюючи розміри, форму, хімічний склад і будову НЧ Fe_3O_4 , можна в певних межах управляти їх ФХП [2, 34–35], які визначаються технологією виробництва НЧ.

Тому необхідні коригування технологічної моделі виробництва НЧ Fe_3O_4 з позиції скорочення технологічного процесу та зменшення енерговитрат за одночасного одержання продукту з необхідними ФХП та ФТВ, високими показниками якості та безпечності.

3.2. Наукове обґрунтування технології наночастинок оксидів заліза для харчової продукції

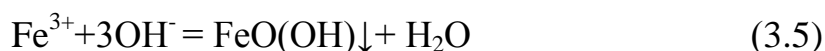
Дисперсність та морфологія НЧ є найважливішим чинником, що формує фізико-хімічні показники НЧ та безпосередньо залежить від умов одержання [392, 466, 473–476]. Серед технологій виробництва наночастинок, які можуть бути використані для одержання НЧ Fe_3O_4 , ефективною є технологія хімічної конденсації. Вона є досить простою, не потребує дорогого обладнання і дозволяє регулювати ФХП цільового продукту та

одержувати частинки майже без домішок. Рівняння реакції отримання НЧ Fe_3O_4 можуть бути представлені рівняннями (3.1) та (3.2) відповідно:

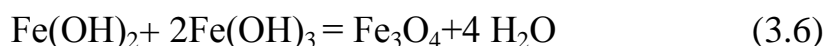


Однак, незважаючи на популярність цього методу, питання вибору раціональних технологічних параметрів та режимів отримання НЧ Fe_3O_4 заданої структури, морфології, розмірів і з вузьким розподілом за розмірами досліджені вкрай слабо, причому більша частина таких робіт є ноу-хау комерційних компаній. Тобто наявні технологічні моделі виробництва НЧ Fe_3O_4 (шляхом конденсації солей у лужному середовищі з ефектом солюбілізації) не відповідають необхідним ФХП та ФТВ (дисперсність, морфологія частинок; структуроутворювальні, стабілізуювальні, загущувальні, тиксотропні, антиоксидантні властивості; здатність коригувати емульгуювальну, водо- і жирутримувальну, піно-і гелеутворювальну здатність поліфазних систем). Зазвичай, теоретичним підґрунтям аналізу такої технології обирають фізико-хімічні закони й закономірності термодинамічного та молекулярно-кінетичного рівня опису процесу виробництва. Для обґрунтування можливості перебігу технологічного процесу в напрямі отримання НЧ Fe_3O_4 були розраховані термодинамічні характеристики можливих побічних реакцій.

Враховуючи перебіг реакції за умов лужної реакції середовища, можна прогнозувати реакції катіонів ферума Fe(II) та Fe(III) з гідроксид-іонами з утворенням відповідних гідроксидів Fe(OH)_2 , Fe(OH)_3 , FeO(OH) за такими рівняннями реакцій:



В умовах лужного середовища, враховуючи можливість утворення гідроксидів, реакція утворення НЧ Fe_3O_4 може перебігати за рівнянням (3.6):



Зміну енергії Гіббса, ентальпії та ентропії реакції розраховували з використанням наслідку із закону Гесса за відомими вихідними [477, 478] значеннями термодинамічних характеристик (табл. 3.1):

$$\Delta G^\circ_{\text{реак.}} = \sum \Delta G^\circ_{(\text{прод.реак.})} - \sum \Delta G^\circ_{(\text{вих.реч.})}$$

$$\Delta S^\circ_{\text{реак.}} = \sum \Delta S^\circ_{(\text{прод.реак.})} - \sum \Delta S^\circ_{(\text{вих.реч.})}$$

$$\Delta H^\circ_{\text{реак.}} = \sum \Delta H^\circ_{(\text{прод.реак.})} - \sum \Delta H^\circ_{(\text{вих.реч.})}$$

Таблиця 3.1.

Термодинамічні величини (при 298°К) та добуток розчинності

Речовина	Агрегатний стан	$\Delta G^\circ_{\text{утв.}}$, кДж/моль	$\Delta H^\circ_{\text{утв.}}$, кДж/моль	ΔS° , Дж/(моль·К)	ДР (добуток розчинності)
Fe_3O_4	кристалічний	-1027,7	-1117,90	151,46	—
H_2O	рідина	-262,8	-286,02	69,94	—
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	кристалічний	-493,00	-573,21	92,47	$4,8 \cdot 10^{-16}$
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	кристалічний	-716,63	-844,33	96,20	$3,8 \cdot 10^{-38}$
Fe^{2+}	водний розчин	-84,94	-87,86	-113,4	—
Fe^{3+}	водний розчин	-10,54	-47,70	-293,3	—
OH^-	водний розчин	-157,3	-230,02	-10,54	—
$\text{FeO}(\text{OH})$	кристалічний	-490,4	-558,98	67,36	$7,0 \cdot 10^{-40}$

Величини добутку розчинності для речовини $\text{FeO}(\text{OH})$ була розрахована з використанням реакції (3.5). Вираз константи рівноваги процесу, що перебігає за рівнянням (3.5), має вигляд:

$$K_p = \frac{[\text{FeO}(\text{OH})] \cdot [\text{H}_2\text{O}]}{[\text{Fe}^{3+}] \cdot [\text{OH}^-]^3}$$

При врахуванні певних умов: $[\text{FeO}(\text{OH})]=1$ моль/л, $[\text{H}_2\text{O}]=55,5$ моль/л,

$D_{P_{\text{Fe}(\text{OH})_3}} = [\text{Fe}^{3+}] \cdot [\text{OH}^-]^3 = 3,8 \cdot 10^{-38}$, маємо таке:

$$D_{P_{\text{FeO}(\text{OH})}} = \frac{3,8 \cdot 10^{-38}}{55,5} = 7 \cdot 10^{-40}.$$

Розрахунки термодинамічних величин реакцій (3.1, 3.3–3.5) наведені у Додатку А.1. Результати розрахунків – у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

Розрахункові термодинамічні характеристики

№ реакції	$\Delta G^{\circ}_{x.p.}$, кДж/моль	$\Delta H^{\circ}_{x.p.}$, кДж/моль	K_p	$\Delta S^{\circ}_{x.p.}$, Дж/(моль·К)
3.1	-760,1	-238,56	10^{133}	1210,48
3.3	-93,46	-25,31	10^{16}	226,95
3.4	-234,19	-106,57	10^{41}	421,12
3.5	-270,76	-107,24	10^{47}	462,22

Аналіз табл. 3.2 показує, що ентальпія та зміна енергії Гіббса реакції (3.1) має найбільше негативне значення; константа рівноваги суттєво перевищує значення констант рівноваги реакцій (3.3), (3.4) та (3.5). Це свідчить про перевагу протікання реакції (3.1) – рівновага цієї реакції зсунута праворуч, у бік утворення досить стійкої сполуки – наночастинок Fe_3O_4 , а не гідроксидів ферума (II) та (III): $FeO(OH)$, $Fe(OH)_3$, $Fe(OH)_2$.

Ентропія реакцій (3.1) має суттєво більше значення, ніж ентропія інших можливих реакцій (3.3) – (3.5). Можливо, це пов'язано з магнітними властивостями цільового продукту (Fe_3O_4). Усі реакції є екзотермічними процесами. При проведенні реакції (3.1) спостерігається збільшення температури реакційної суміші до (50 ± 5) °С, що підтверджується термодинамічними розрахунками.

Обґрунтування технологічних параметрів виробництва НЧ Fe_3O_4 .
Відомо, що осад випадає тоді, коли добуток рівноважних концентрацій іонів у розчині більше величини ДР осаду.

Для обґрунтування напряму перебігу процесу одержання НЧ Fe_3O_4 визначимо концентрації $[Fe^{3+}]$, $[Fe^{2+}]$, $[OH^-]$, добуток рівноважних концентрацій іонів у розчині після утворення цільового продукту (осаду Fe_3O_4) в умовах одержання НЧ Fe_3O_4 та порівняємо з величинами добутку розчинності ($DP_{Fe(OH)_2}$, $DP_{Fe(OH)_3}$, $DP_{FeO(OH)}$).

В основі розрахунків лежить припущення, що в умовах процесу одержання утворюється переважно НЧ Fe_3O_4 , тобто процес іде у напрямі

реакції (3.1). При цьому нехтуємо реакціями комплексоутворення та окиснення. Припустимо, що концентрації Fe (II) та Fe (III) згідно з реакцією (3.1) знаходяться в еквімолярному співвідношенні:

$$[\text{Fe}^{2+}] = 2[\text{Fe}^{3+}] \text{ або } 0,5[\text{Fe}^{2+}] = [\text{Fe}^{3+}], \text{ при } \text{pH} = 11, \text{ тоді } [\text{OH}^-] = 10^{-3} \text{ моль/л.}$$

Запишемо вираз константи рівноваги реакції (3.1):

$$K_p = \frac{[\text{Fe}_3\text{O}_4] \cdot [\text{H}_2\text{O}]^4}{[\text{Fe}^{2+}] \cdot [\text{Fe}^{3+}] \cdot [\text{OH}^-]^8}.$$

Враховуючи, що Fe_3O_4 – тверда речовина, вираз константи рівноваги набуде вигляду:

$$K_p = \frac{[\text{H}_2\text{O}]^4}{[\text{Fe}^{2+}] \cdot [\text{Fe}^{3+}] \cdot [\text{OH}^-]^8}.$$

При відомих значеннях $[\text{H}_2\text{O}] = 55,5$ моль/л, $[\text{OH}^-] = 10^{-3}$ моль/л, $[\text{Fe}^{2+}] = 2[\text{Fe}^{3+}]$, маємо наступне:

$$K_p = \frac{(55,5)^4}{2 \cdot [\text{Fe}^{3+}]^3 \cdot (10^{-3})^8}$$

Константа рівноваги реакції пов'язана із стандартною зміною енергії Гіббса реакції таким рівнянням:

$$\Delta G = - 2,313 RT \lg K$$

$$\text{де } R = 8,134 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}, \quad T = 298^\circ\text{К.}$$

Враховуючи, що для реакції (3.1) стандартна зміна енергії Гіббса реакції має значення $\Delta G^\circ_{\text{x.p.}} = -760,10$ кДж/моль (табл. 3.2), можна записати:

$$K_p = e^{\frac{\Delta G^\circ_{\text{x.p.}}}{RT}} = e^{\frac{-7601}{8,314298}} = 0,9 \cdot 10^{133} \approx 10^{133}.$$

У подальших розрахунках знайдемо концентрацію катіонів ферума (III):

$$[\text{Fe}^{3+}] = \sqrt[3]{\frac{4,75 \cdot 10^{30}}{K_p}};$$

$$[\text{Fe}^{3+}] = \sqrt[3]{\frac{4,75 \cdot 10^{30}}{0,9 \cdot 10^{133}}} = 3,7 \cdot 10^{-34} \approx 4 \cdot 10^{-34} \text{ (моль/л)}$$

$$[\text{Fe}^{2+}] = 2[\text{Fe}^{3+}] = 8 \cdot 10^{-34} \text{ (моль/л)}$$

Концентрацію катіонів ферума (II) визначимо, виходячи з виразу константи рівноваги K_p для реакції (3.3):

$$K_p = \frac{[Fe(OH)_2]}{[Fe^{2+}] \cdot [OH^-]^2} = \frac{1}{[Fe^{2+}] \cdot [OH^-]^2}, \text{ звідки}$$

$$[Fe^{2+}] = \frac{1}{K_p [OH^-]^2} = \frac{1}{10^{16} \cdot 10^{-6}} = 10^{-10} \text{ (моль/л)}$$

Таким чином, унаслідок проведених розрахунків можна зробити висновок: щоб зсунути рівновагу реакції (3.3) вправо – у бік утворення $Fe(OH)_2$, необхідна величина концентрації катіонів ферума (II) у розчині $[Fe^{2+}] \geq 10^{-10}$ моль/л. За наведеним алгоритмом визначимо необхідні концентрації катіонів ферума у розчині для утворення осадів за реакціями (3.4) та (3.5). Знайдемо $[Fe^{3+}]$ на основі величини K_p (табл. 3.2) для реакції (3.4):

$$K_p = \frac{[Fe(OH)_3]}{[Fe^{3+}] \cdot [OH^-]^3} = \frac{1}{[Fe^{3+}] \cdot [OH^-]^3};$$

$$[Fe^{3+}] = \frac{1}{K_p [OH^-]^3} = \frac{1}{10^{41} \cdot 10^{-9}} = 10^{-32} \text{ (моль/л)}$$

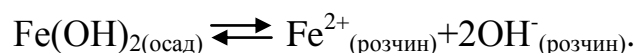
У такому разі, для зміщення рівноваги реакції (3.4) вправо – у бік утворення $Fe(OH)_3$ необхідна концентрація катіонів ферума (III) у розчині $[Fe^{3+}] \geq 10^{-32}$ моль/л. Визначимо $[Fe^{3+}]$ на основі величини K_p (табл. 3.2) для реакції (3.5):

$$K_p = \frac{[FeO(OH)] \cdot [H_2O]}{[Fe^{3+}] \cdot [OH^-]^3} = \frac{55.5}{[Fe^{3+}] \cdot [OH^-]^3};$$

$$[Fe^{3+}] = \frac{55.5}{K_p [OH^-]^3} = \frac{55.5}{10^{47} \cdot 10^{-9}} = 10^{-33} \text{ (моль/л)}.$$

Звідки видно, що для зміщення рівноваги реакції (3.5) вправо – у бік утворення $FeO(OH)$ необхідна концентрація катіонів ферума (III) у розчині $[Fe^{3+}] \geq 10^{-33}$ моль/л.

У побічній реакції (3.3) має утворитися ферум (II) гідроксид. У такому разі між насиченим розчином та важкорозчинною сполукою встановиться термодинамічна рівновага:



Ця рівновага характеризується добутком розчинності ($DP_{Fe(OH)_2}$):

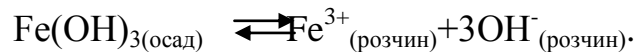
$$DP_{Fe(OH)_2} = [Fe^{2+}] \cdot [OH^-]^2 = 4.8 \cdot 10^{-16}, \text{ звідки}$$

$$[Fe^{2+}] = \sqrt[3]{\frac{DP}{4}} = \sqrt[3]{\frac{4.8 \cdot 10^{-16}}{4}} = 0.49 \cdot 10^{-5} \text{ (моль/л)}.$$

Саме з концентрації ферума (II), що дорівнює $0.49 \cdot 10^{-5}$ моль/л та більшої буде випадати осад $Fe(OH)_2$; у нашому розчині $[Fe^{2+}] = 8 \cdot 10^{-34}$ моль/л, що значно менше за $0.49 \cdot 10^{-5}$ моль/л. Добуток рівноважних концентрацій іонів у водному розчині (в умовах одержання НЧ Fe_3O_4):

$$[Fe^{2+}] \cdot [OH^-]^2 = 8 \cdot 10^{-34} \cdot (10^{-3})^2 = 8 \cdot 10^{-40}.$$

Очевидно, що $[Fe^{2+}] \cdot [OH^-]^2 = 8 \cdot 10^{-40} \ll DP_{Fe(OH)_2} = 4.8 \cdot 10^{-16}$. Тобто осад $Fe(OH)_2$ не утворюється, синтез у напрямку реакції (3.3) не йде. У побічній реакції (3.4) має утворюватися ферум (III) гідроксид. Аналогічно наведеним вище міркуванням у розчині встановлюється рівновага:



$$DP_{Fe(OH)_3} = [Fe^{3+}] \cdot [OH^-]^3 = 3.8 \cdot 10^{-38}.$$

$$\text{Звідки } [Fe^{3+}] = \sqrt[4]{\frac{DP}{27}} = \sqrt[4]{\frac{3.8 \cdot 10^{-38}}{27}} = 0.2 \cdot 10^{-9} \text{ (моль/л)}.$$

Саме з концентрації ферума (III), що дорівнює $0.2 \cdot 10^{-9}$ моль/л та більшого $DP_{Fe(OH)_3}$ буде випадати осад $Fe(OH)_3$, у нашому розчині $[Fe^{3+}] = 4 \cdot 10^{-34}$ моль/л, що значно менше за $0.2 \cdot 10^{-9}$ моль/л. Добуток рівноважних концентрацій іонів у водному розчині (в умовах одержання НЧ Fe_3O_4):

$$[Fe^{3+}] \cdot [OH^-]^3 = 4 \cdot 10^{-34} \cdot (10^{-3})^3 = 4 \cdot 10^{-43}.$$

$$\text{Очевидно, що } [Fe^{3+}] \cdot [OH^-]^3 = 4 \cdot 10^{-43} \ll DP_{Fe(OH)_3} = 3.8 \cdot 10^{-38}.$$

Що також свідчить про неможливість утворення осаду $Fe(OH)_3$, і відповідно процес одержання НЧ Fe_3O_4 у напрямку реакції (3.4) не йде. У побічній реакції (3.5) утворюється осад $FeO(OH)$. Подібно викладеному вище маємо $DP_{FeO(OH)} = 7 \cdot 10^{-40}$.

$$\frac{[Fe^{3+}] \cdot [OH^-]^3}{[H_2O]} = \frac{4 \cdot 10^{-34} \cdot (10^{-3})^3}{55.5} = 7 \cdot 10^{-45},$$

що менше за добуток розчинності, який дорівнює $DP_{FeO(OH)}=7 \cdot 10^{-40}$. Звідки видно, що утворення осаду FeO(OH) за реакцією (3.5) проблематично.

З термодинамічних розрахунків, визначено концентрації іонів Fe²⁺ та Fe³⁺ у розчині:

$$[Fe^{3+}] = 4 \cdot 10^{-34} \text{ моль/л}, [Fe^{2+}] = 8 \cdot 10^{-34} \text{ моль/л}.$$

При таких концентраціях не досягаються умови утворення осадів за побічними реакціями Fe(OH)₂, Fe(OH)₃, FeO(OH), НЧ Fe₃O₄ є основним продуктом реакції. Проведені термодинамічні розрахунки [479] повністю підтверджують, що за дібраних параметрів напрям перебігу процесу одержання НЧ Fe₃O₄ зміщений у бік утворення Fe₃O₄.

Отже, самовільне утворення НЧ Fe₃O₄ в межах 70...80 нм відбувається (за рівнянням 3.1) при виконанні таких режимів технологічного процесу: 10% розчини солей дво- та тривалентного феруму у лужному середовищі рН=10...11 од. при температурі $t=(50 \pm 5)^\circ\text{C}$ та $(1,75 \pm 0,5)$ надлишку солі двовалентного феруму і 10,0...10,5 кратному надлишку NH₃·H₂O. Надлишок вихідних речовин дозволяє повністю зсунути рівновагу в бік утворення осаду Fe₃O₄ та зумовлює високий ваговий вихід цільового продукту.

3.3. Експериментальне підтвердження технологічних параметрів виробництва наночастинок оксидів заліза (Fe₃O₄)

З теоретичних даних робимо висновок, що на розмір НЧ Fe₃O₄ впливає рН середовища та його значення на стадії конденсації має становити: рН=10...11. На рис. 3.1 представлені діаметри частинок Fe₃O₄, що одержані при різних значеннях рН реакційного середовища. Середній діаметр НЧ Fe₃O₄ оцінювали за рівнянням Шеррера піків рентгенограми (XRD) [334, 345, 346, 480].

Звідки видно, що діаметри частинок Fe₃O₄ зменшуються від 100 нм до 80 нм зі збільшенням рН розчину від 8 до 11. При рН>11 діаметр НЧ Fe₃O₄ збільшується до 90 нм. Це пов'язано з процесами гідролізу Fe₃O₄ за катіонами

Fe^{3+} і Fe^{2+} з утворенням побічних продуктів $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{FeO}(\text{OH})$ і $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (розмір частинок яких значно перевищує нанорозміри) згідно з наведеним термодинамічним аналізом і попередніми дослідженнями [479].

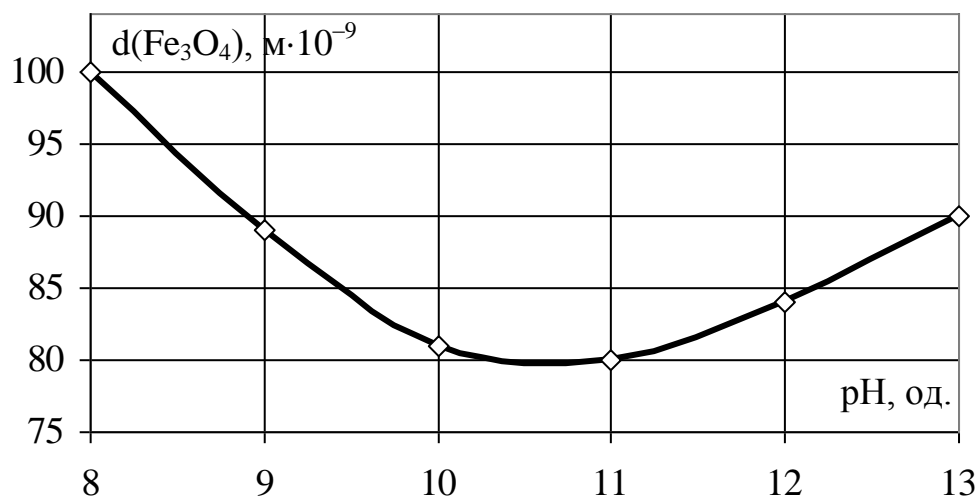


Рис. 3.1. Вплив рН реакційного середовища на діаметр НЧ Fe_3O_4 [температура: $(50\pm 5)^\circ\text{C}$, швидкість перемішування (1500 ± 5) об/хв, співвідношення $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}=2:1,75$]

Зачення $\text{pH} < 10$ (рис. 3.1) сприяє формуванню досить великих за розміром частинок гідросокомплексів феруму загальної формули $[\text{Fe}^{+2}_4\text{Fe}^{+3}_2\text{O}_4(\text{OH})_{12}]\text{Cl}_2$ і $[\text{Fe}^{+2}_4\text{Fe}^{+3}_2\text{O}_4(\text{OH})_{12}]\text{SO}_4$ [479, 481]. Слід зазначити, що необхідний діапазон значень $\text{pH}=10\dots 11$ од. створюється точним дозуванням 25% розчину $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$, контрольований потенціометром, і підтримується утворенням буферної системи, яка виникає в реакційному середовищі, – $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_4\text{Cl} + \text{NH}_4(\text{SO}_4)$.

З наведених теоретичних розрахунків і попередніх досліджень [479] випливає залежність діаметра частинок Fe_3O_4 від природи солей ферума (II), (III) і лугів, а також від масової частки лугів та співвідношення $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$. Залежність діаметру частинок Fe_3O_4 від природи солей ферума (II), (III) та співвідношення $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ наведена на рис. 3.2, а. Вона має екстремальний характер з явно вираженим мінімумом при співвідношенні $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}=2:1,75$. Також слід зазначити, що використання надлишку солі ферума (II) – $(1,75\pm 0,5)$ веде до покращення ФХП НЧ Fe_3O_4 і повністю відповідає

термодинамічним розрахункам. Надлишок масової частки катіонів Fe^{2+} обумовлений його високою відновною активністю.

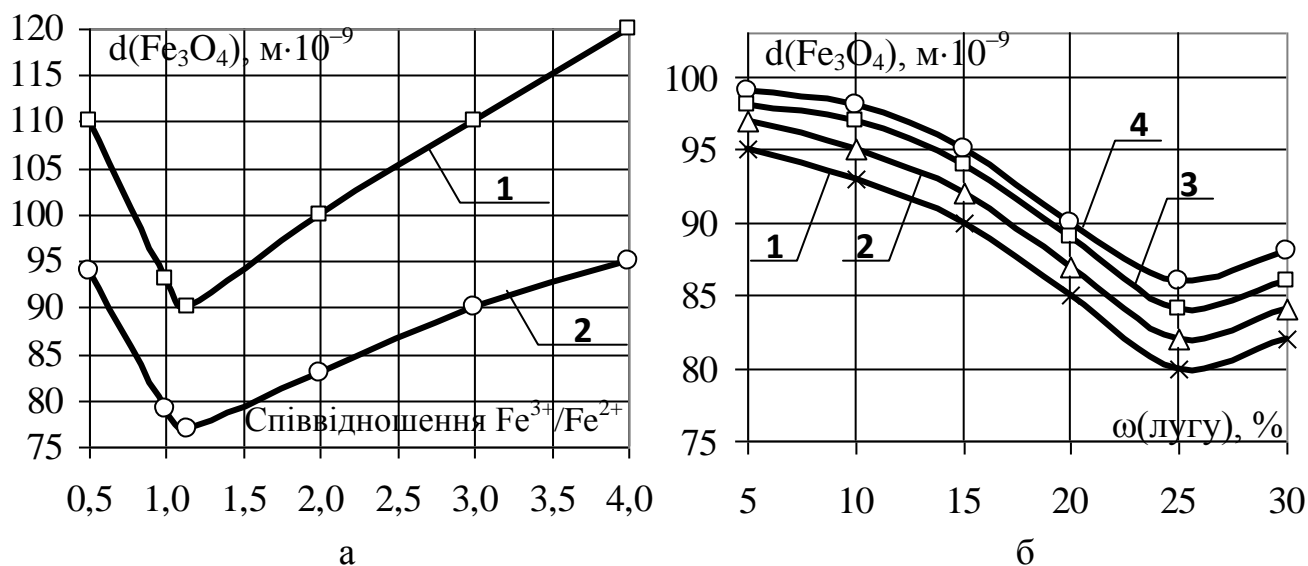


Рис. 3.2. Залежність діаметру частинок Fe_3O_4 від природи солей ферума (II), (III) і співвідношення $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ (а) (1– $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 2– FeCl_2) та від масової частки лугів різної природи (б) (1 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 2 NaOH , 3 KOH , 4 LiOH)

З даних рис. 3.2, а також випливає, що використання солей $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ та $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ сприяє одержанню частинок Fe_3O_4 меншого розміру, ніж при використанні $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ та $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Вплив природи і масової частки лугу (гідроксиду літію, гідроксиду калію, гідроксиду натрію, гідрату аміаку) на діаметр НЧ Fe_3O_4 показано на рис. 3.2, б. Встановлено, що не тільки величина рН але й хімічні сполуки, що утворюють цю величину, можуть впливати на розміри та склад НЧ. Це пов'язано з тим, що розчини, які утворюють певні рН у водному середовищі, характеризуються іонним складом, а самі іони є активними з точки зору електрохімічної взаємодії з полярними молекулами або частинками. Так, діаметр НЧ Fe_3O_4 збільшується в ряду: $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} > \text{NaOH} > \text{KOH} > \text{LiOH}$ (рис. 3.2, б). А з ростом масової частки лугу з 5 мас.% до 25 мас.% діаметр частинок Fe_3O_4 зменшується для усіх лугів. Для систем з NaOH , KOH , LiOH збільшення масової частки до 30% приводить до зростання діаметра частинок Fe_3O_4 . При цьому показано, що при використанні гідрату аміаку найменший середній діаметр частинок Fe_3O_4

спостерігається при масовій частці $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, яка дорівнює 25 мас.% (рис. 3.2, б). Також використання (10,0–10,5) кратного надлишку розчину амоній гідроксиду дозволяє одержати частинки Fe_3O_4 з діаметром 70...80 нм та з вузькою і симетричною функцією розподілу частинок за діаметром (N, %) на відміну від частинок, отриманих з використанням розчинів інших лугів (рис. 3.3).

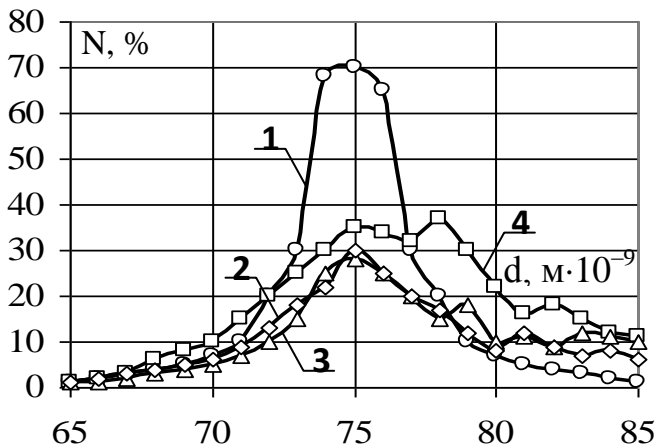


Рис. 3.3. Розподіл НЧ Fe_3O_4

за діаметром, одержаних з використанням розчинів лугів: 1 – $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$; 2 – NaOH ; 3 – KOH ; 4 – LiOH

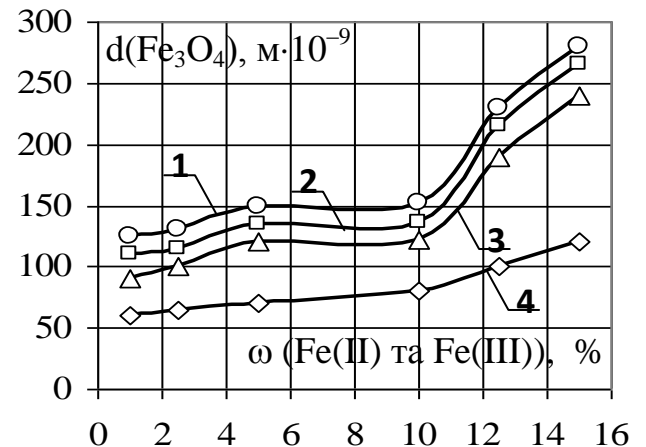


Рис. 3.4. Залежність діаметра НЧ

Fe_3O_4 від ω солей Fe (II) і Fe (III) при швидкості обертів мішалки: 1– 5с^{-1} ; 2– $8,3\text{с}^{-1}$; 3– $16,7\text{с}^{-1}$; 4– 25с^{-1}

Крім того, при використанні розчинів лугів у співвідношенні $[\text{OH}^-]/([\text{Fe}^{2+}] + [\text{Fe}^{3+}])=1,5$ формується $\text{Fe(II)}\text{--}\text{Fe(III)}$ – шароподібна структура (*Green Rust*) – гідроксикомплекс загальної формули $[\text{Fe}^{\text{II}}_4\text{Fe}^{\text{III}}_2\text{O}_4(\text{OH})_{12}]^{2+}\text{An}^{2-}$, структурний склад та ФХП якого відрізняються від вихідної сполуки $[\text{Fe}_3\text{O}_4$ або $(\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO})]$ [481–483]. Використання розчину амоній гідроксиду дозволяє створити м'які умови співосадження катіонів ферума, що сприяє протіканню технологічного процесу з утворенням саме НЧ Fe_3O_4 , що наближає їх до монодисперсності. Для зсуву протікання процесу у бік утворення Fe_3O_4 використовували $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ та $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Тим самим досягається однорідність хімічного складу НЧ Fe_3O_4 . Тобто досягається мета стабільності ФХП та певного фіксованого хімічного складу цільового продукту.

Ще одним чинником, який впливає на дисперсність НЧ Fe_3O_4 , є масові частки (ω) солей Fe (II) і Fe (III) в системі (рис. 3.4). При розглянутих

швидкостях перемішування (5,0; 8,3; 16,7; 25,0) с^{-1} з підвищенням ω солей Fe (II) і Fe (III) у системі спостерігається збільшення середнього діаметра, при цьому, крім НЧ Fe_3O_4 з діаметром більше 105 нм, присутні й агрегати частинок розміром 180...280 нм.

Визначено, що важливим технологічним етапом виробництва НЧ Fe_3O_4 є приготування 10% водних розчинів солей ферума, наукова складова обґрунтування якого полягає у запропонованій моделі «тісного контакту». Виходячи з термодинамічного рівня опису процесу, проведені дослідження щодо впливу температури на розмір та вихід НЧ Fe_3O_4 .

На рис. 3.5 наведено рентгенограми НЧ Fe_3O_4 , одержаних при температурах: 25°C, 50°C, 65°C і 80°C. Середній діаметр НЧ Fe_3O_4 оцінювали за рівнянням Шеррера піків рентгенограми (XRD) [334, 340, 345, 346, 480].

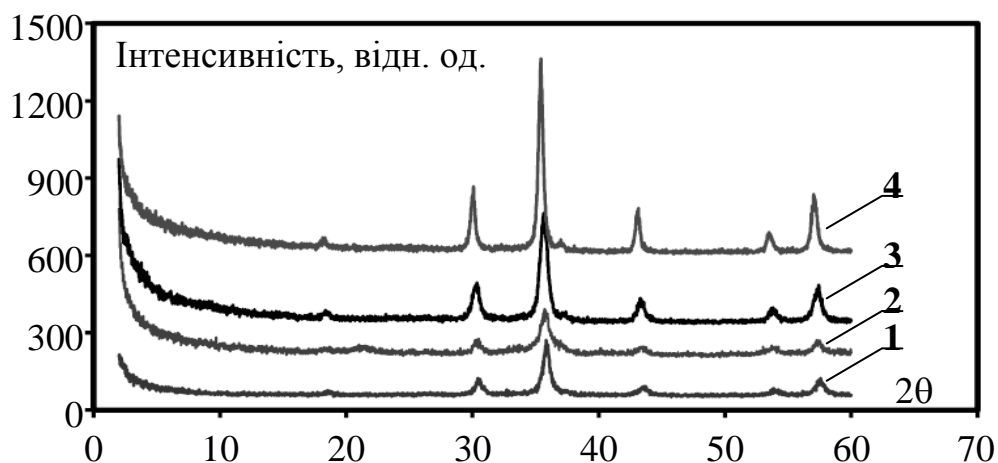


Рис. 3.5. Рентгенографічні дифрактограми НЧ Fe_3O_4 , одержаних при різних температурах: 1–25°C, 2–50°C, 3–65°C, 4–80°C ($\text{pH}=11$, $n=(25,0\pm 0,1)\text{с}^{-1}$)

Результати рентгенофазового аналізу (рис. 3.5) показують, що одержаним НЧ Fe_3O_4 відповідає шпінельна структура з кубічно-центрованою фазою; інтенсивність піків Брегга збільшується при підвищенні температури. Діаметр НЧ Fe_3O_4 зменшується зі 100 нм до 80 нм при збільшенні температури процесу конденсації від 25°C до 50°C. Це пов'язано зі зменшенням ступеня агрегації НЧ. А при подальшому зростанні температури технологічного процесу від 50°C до 80°C діаметр НЧ Fe_3O_4 збільшується зі 80 нм до 90 нм, оскільки що при підвищенні температури всередині розчину

зростає енергія, збільшуючи рухливість молекул, що викликає більше число зіткнень між НЧ та їх агрегацію. Отже, температура (50 ± 5) °С буде раціональною для технологічної операції «конденсація». На рис. 3.6 наведено залежність виходу НЧ Fe_3O_4 від тривалості їх осадження (τ) при температурах: 25°С, 35°С, 45°С, 50°С, 55°С. Звідки видно, що зі збільшенням температури зростає швидкість утворення НЧ Fe_3O_4 , а їх максимальний вихід спостерігається при температурі (50 ± 5) °С.

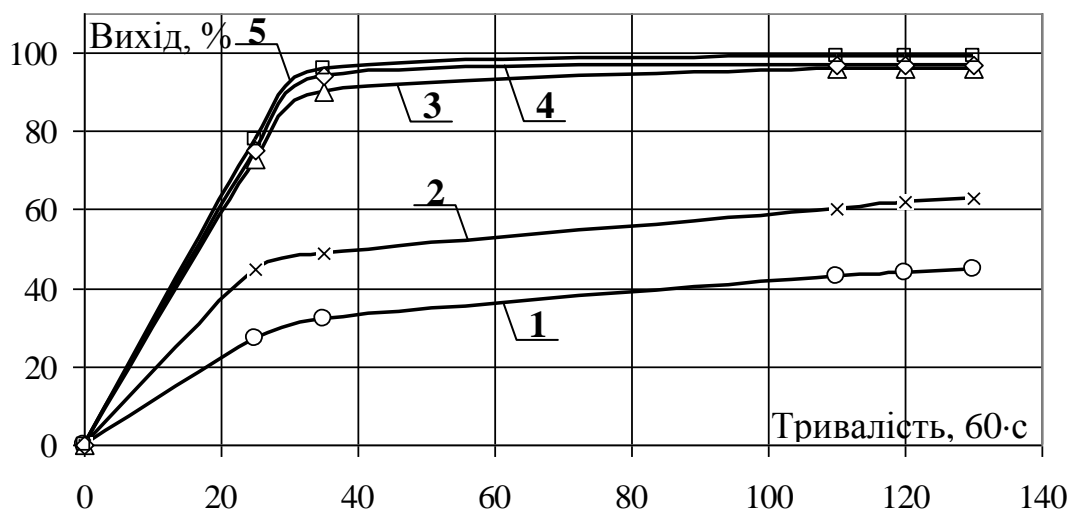
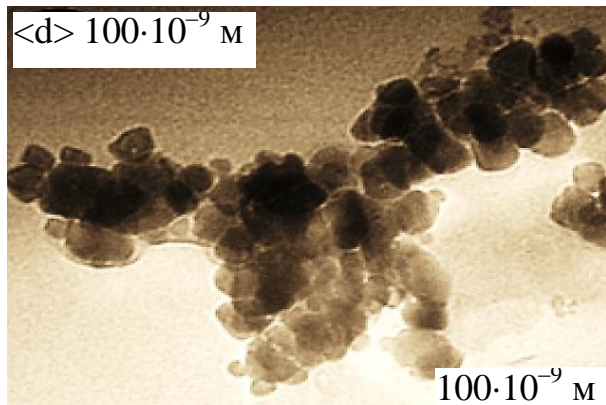
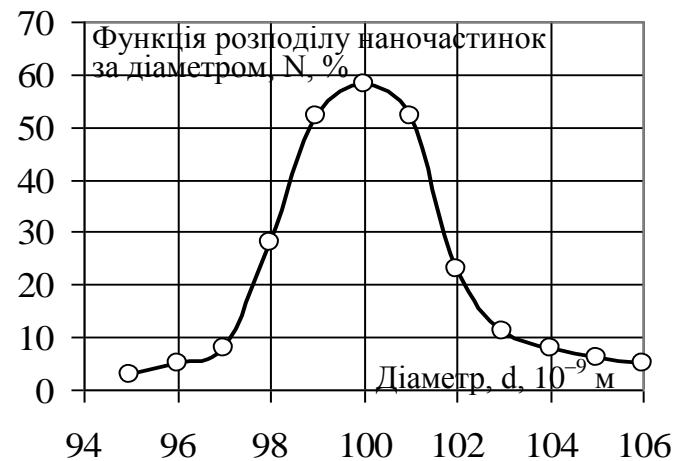


Рис. 3.6. Залежність виходу НЧ Fe_3O_4 від тривалості їх осадження при температурах: 1 – 25°С, 2 – 35°С, 3 – 45°С, 4 – 50°С, 5 – 55 °С ($\text{pH}=11$, швидкість обертів мішалки: $(25,0\pm 0,1)$ с^{-1} , $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}=2:1,75$, $\omega(\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O})=10\%$)

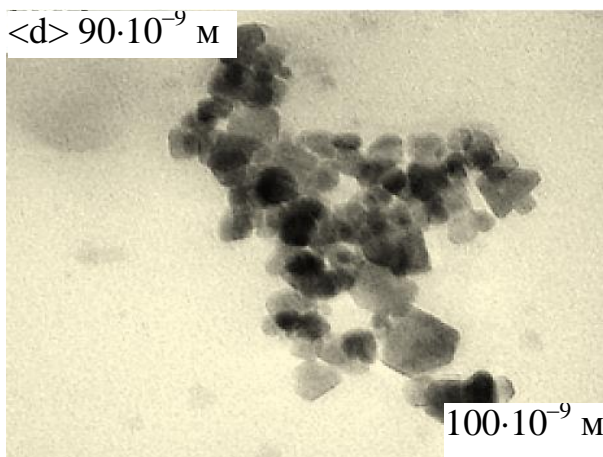
Одним з чинників, що впливає на дисперсність НЧ Fe_3O_4 , є гідродинаміка процесу. Тому були проведені дослідження впливу швидкості перемішування системи на діаметр НЧ Fe_3O_4 (рис. 3.4 та 3.7). Встановлено, що при збільшенні числа обертів пропелерної мішалки (форма мішалки відповідає в'язкості компонентної суміші, що дорівнює $1009\cdot 10^{-6}$ Па·с при 20°С, тобто наближається до в'язкості води) діаметр НЧ Fe_3O_4 зменшується. Оптимальним був обраний режим, при якому швидкість перемішування становила $(25,0\pm 0,1)$ с^{-1} (або (1500 ± 5) об/хв). Результати мікроскопічних досліджень (рис. 3.7) показують, що при збільшенні швидкості обертів мішалки зі $(8,3\pm 0,1)$ с^{-1} до $(25,0\pm 0,1)$ с^{-1} середній діаметр НЧ Fe_3O_4 зменшився зі (100 ± 1) нм до (80 ± 1) нм.



а



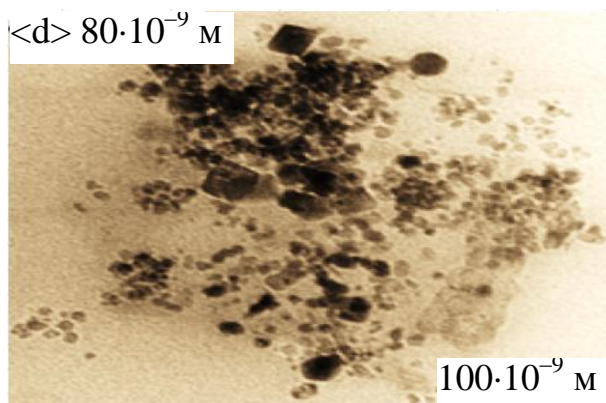
б



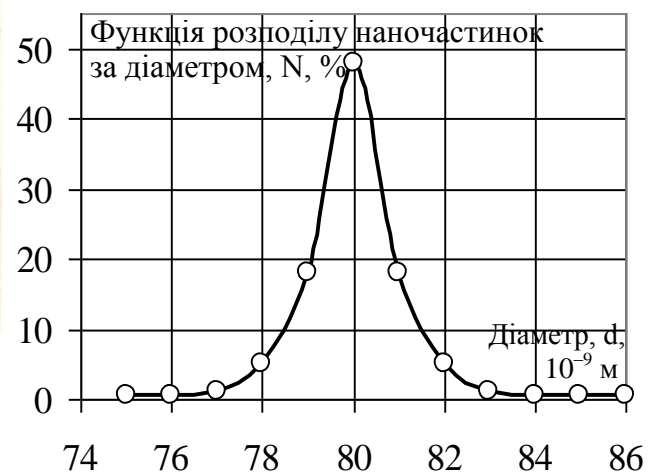
в



г



д



е

Рис. 3.7. Мікроструктура (а, в, д) та розподіл за діаметром (б, г, е) НЧ Fe_3O_4 , одержаних при різній швидкості обертів мішалки: а, б – $(8,3 \pm 0,1) \text{ c}^{-1}$; в, г – $(16,7 \pm 0,1) \text{ c}^{-1}$; д, е – $(25 \pm 0,1) \text{ c}^{-1}$ ($\text{pH}=11$, $t=(50 \pm 5)^\circ\text{C}$)

Це пов'язано, по-перше, зі збільшенням енергії, що передається суспензійному середовищу, диспергуванням реакційного розчину в більш дрібні краплі [357]. По-друге, з аномальною дифузією частинок при більш високому ступеню перемішування, що зменшує кінетику росту частинок і приводить до зменшення їх розміру [484]. Крім того, відсутня зміна діаметру НЧ Fe_3O_4 , коли швидкість обертів мішалки вища $(25,0 \pm 0,1) \text{ c}^{-1}$. Також з експерименту ми бачимо великі утворення бульбашок з розбризкуванням реакційного розчину, коли швидкість обертів мішалки була вищою $(25,0 \pm 0,1) \text{ c}^{-1}$. Отже, $(25,0 \pm 0,1) \text{ c}^{-1}$ можна вважати раціональною швидкістю перемішування для процесу одержання НЧ Fe_3O_4 . Також при фіксованій температурі досліджено кінетику процесу отримання НЧ Fe_3O_4 і показано, що при температурі $(50 \pm 5)^\circ\text{C}$ тривалість технологічної операції «конденсація» становить $(110 \dots 120) \times 60 \text{ c}$.

Таким чином, у результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень визначено раціональні технологічні параметри, що регулюють однорідність за хімічним складом та дисперсність НЧ Fe_3O_4 (з діаметром в основній фракції $\langle d \rangle < 80 \text{ нм}$) [439, 473] (Додатки Б.1, Б.9)

Технологічна схема виробництва харчової добавки «Магнетофуд» (ХДМ) (ТУ У 10.8-2023017824-001:2018) наведена на рис. 3.8 та додатку Б.9): на стадії А – «Підготовки сировини»: використання солей ферума – $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ та $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$; дозування сировинних компонентів у вигляді 10 % розчинів. Запропонована модель «Тісного контакту» при утворенні розчину до технологічної операції – фільтрування. Далі перемішування сольових розчинів протягом $(3 \dots 5) \cdot 60 \text{ c}$ при температурі $(45 \dots 50)^\circ\text{C}$ та швидкості робочого органу змішувача $n = (1,6 \dots 1,7) \text{ c}^{-1}$; на стадії В – «Виробництво харчової добавки «Магнетофуд»», зокрема на технологічній операції «конденсація»: проведення процесу в рідкій фазі з раціональними технологічними параметрами: $\text{pH} = 10..11$; температура $(45 \dots 55)^\circ\text{C}$; тривалість $(110 \dots 120) \times 60 \text{ c}$; швидкість перемішування $n = (24,7 \dots 25,0) \text{ c}^{-1}$;

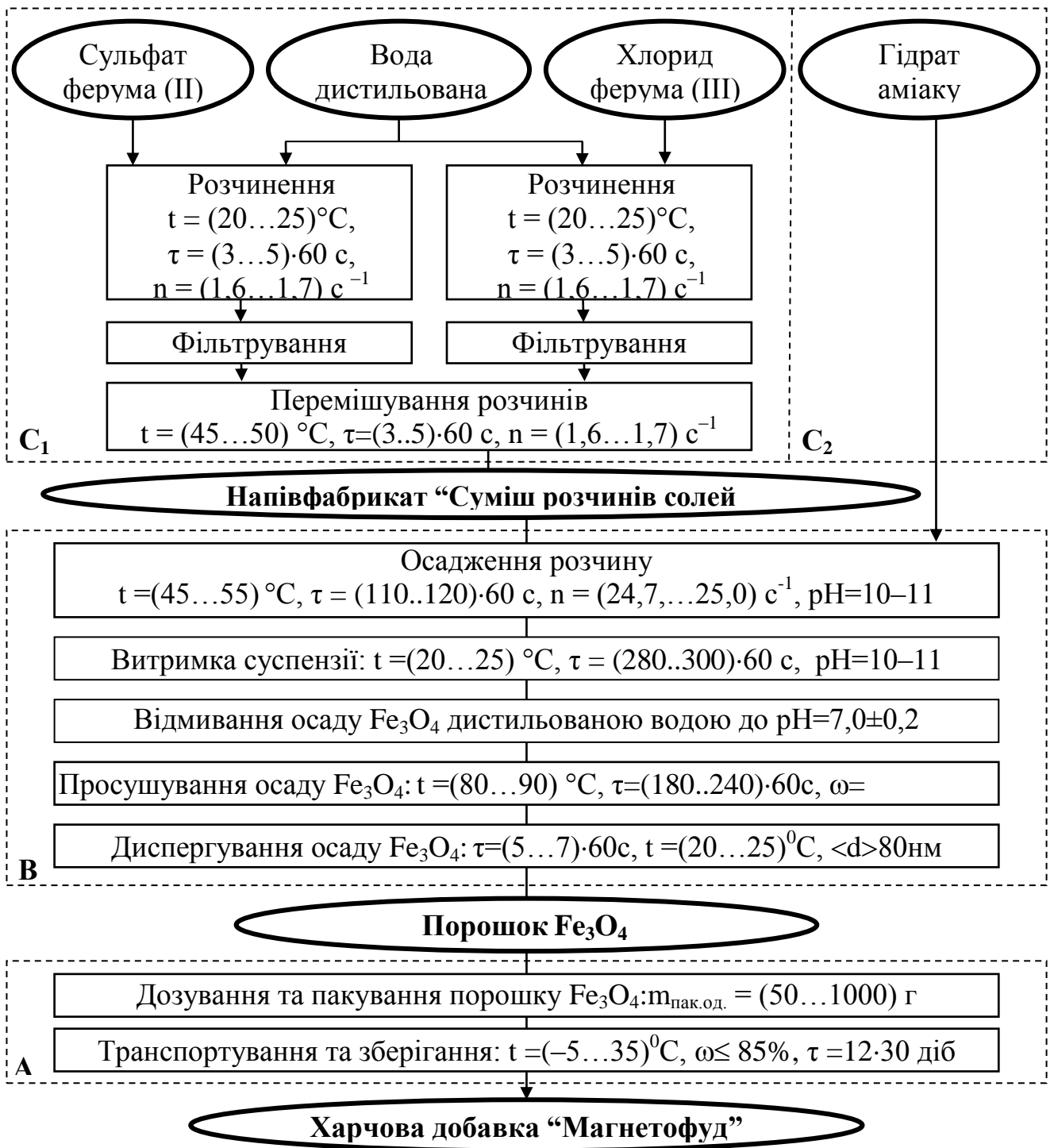


Рис. 3.8. Технологічна схема виробництва харчової добавки «Магнетофуд» (ХДМ): А, В, С₁, С₂ – підсистеми технологічної схеми виробництва ХДМ

співвідношення $Fe^{3+}/Fe^{2+} = 2:1,75$; 10,0...10,5 кратний надлишок 25% розчину $NH_3 \cdot H_2O$; на технологічній операції «витримка суспензії та дозрівання осаду»: температура 20...25°C; тривалість $(280...300) \times 60$ с, рН=10–11; на технологічній операції «відмивання осаду»: рН промивних вод становить $(7,0 \pm 0,5)$; на технологічній операції «просушування»: температура 80...90°C, тривалість $(180...240) \times 60$ с; масова частка вологі, $\omega = (10,0 \pm 0,5)\%$;

– на стадії «Пакування, транспортування та зберігання ХДМ» – атоматичне дозування та пакування, $m_{\text{пак.од.}} = 50...1000$ г; транспортування та зберігання при температурі $-5...35^\circ\text{C}$; відносній вологості повітря $\omega \leq 85\%$; тривалість зберігання 12×30 діб. Практичним результатом цього етапу роботи є ТУ У 10.8-2023017824-001:2018 Харчова добавка «Магнетофуд», технологічна інструкція, патенти (Додатки: Б.1, Б.9, Ж.1, Ж.2). Випущена дослідна партія та здійснено впровадження ХДМ в умовах ТОВ НВП «Гемо-проект», м. Харків (Додатки: Д.1, Р.1).

3.4. Дослідження фізико-хімічних показників ХДМ

Оскільки ХДМ має природне походження (з мінеральних ресурсів), то вихідна сировина, а тому і кінцева продукція можуть коливатися в деякому діапазоні за вмістом хімічних елементів. Слід вважати, що ці домішки не є такими, що суттєво впливатимуть на потенціал ХДМ з точки зору ФТВ для технологій харчової продукції, бо всі вони мають неорганічне походження та містяться в незначних масових частках. Але безпечність продукції потребує ретельного визначення всіх хімічних складових, що вносять до харчових продуктів.

Визначення хімічного складу ХДМ. Враховуючи склад ХДМ – наявність катіонів феруму дво- та тривалентного: $FeO \cdot Fe_2O_3$, визначення їх за умов сумісної присутності методом окисно-відновного титрування є досить сумнівним. Тому вважалось актуальним використовувати експресну рентенофлуоресцентну методику визначення складу ХДМ [335, 336].

На рис. 3.9 наведено фрагмент рентгенофлуоресцентного спектра зразка ХДМ та стандартного зразка заліза в діапазоні довжини хвиль від 1450 мÅ до 2050 мÅ, у якому знаходяться характеристичні хвилі рентгенофлуоресцентного випромінювання Zn, Cu, Ni, Co, Fe, Mn.

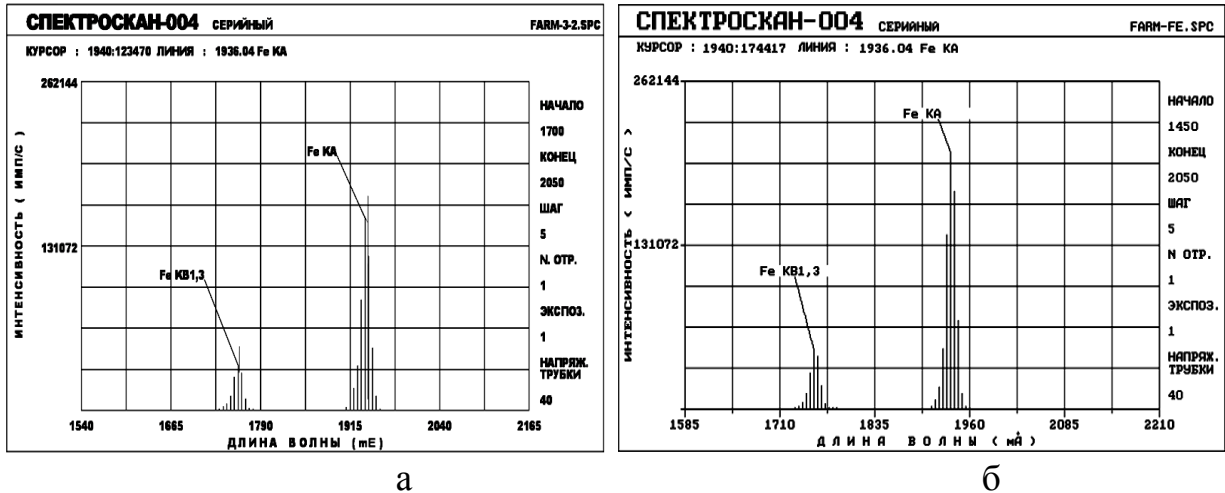


Рис. 3.9. Рентгенофлуоресцентні спектри зразків: а – ХДМ; б – чисте залізо (стандарт)

Спектр ХДМ (рис. 3.9, а) має два головних піки Fe – $K_{\alpha} = 1936$ мÅ та $K_{\beta} = 1757$ мÅ. Кількісний вміст феруму у зразку ХДМ визначали за стандартним зразком особливо чистого заліза по лінії K_{β} (рис. 3.9, б).

В табл.3.3 наведено результати визначення феруму у зразках ХДМ рентгенофлуоресцентним методом.

Таблиця 3.3

Хімічний склад харчової добавки «Магнетофуд»

Ел-т	Fe	Ca	K	S	Si	Al	Mg	Cr	Mn	Ni	Cl
$\omega, \%$	72,62	0,51	0,29	0,45	–	0,28	–	0,06	0,02	0,04	0,05

Встановлено, що у ХДМ (Fe_3O_4) масова частка основної речовини становить $(99,5 \pm 0,1) \%$, сумарна масова частка домішок – менше ніж 2%. Для більш повної і точної оцінки хімічного складу та визначення масової частки загального феруму $\omega_{(Fe)}, \%$ та катіонів феруму: $\omega_{(Fe^{3+})}, \%$ і $\omega_{(Fe^{2+})}, \%$ у складі ХДМ застосовували також спектрофотометричний метод. Результати спектрофотометричних досліджень наведені в табл. 3.4. Вміст $Fe_{\text{заг.}}$ у зразках ХДМ повністю збігаються з даними рентгенофлуоресцентного аналізу і становить $(72,6 \pm 0,1) \%$.

Спектрофотометричний аналіз вмісту Fe(II) та Fe(III) у ХДМ

Наважка, г	Вагова концентрація Fe у розчині, мг/дм ³			Вміст Fe, ω, %		
	Fe ³⁺	Fe _{заг.}	Fe ²⁺	Fe _{заг.} (Fe ₃ O ₄)	Fe ₂ O ₃	FeO
0,4795	241,9±0,2	330,8±0,2	88,6±0,2	72,6 (99,5)±0,1	69,1±0,1	30,9±0,1

Таким чином, обидва методи підтвердили чистоту і хімічний склад ХДМ, а також і той факт, що використання надлишку розчину NH₃·H₂O не викликає змін у вмісті основної речовини [473, 479, 485–487]. Найбільш активними центрами в ХДМ є катіони феруму. Тому вивчення вмісту катіонів Fe³⁺ і Fe²⁺ та обмінних електронних взаємодій всередині наночастинки «Магнетофуд» (НЧМ) є важливою передумовою, що впливає на реакційну здатність і поверхневий хімічний потенціал ХДМ. Для визначення вмісту парамагнітних іонів Fe³⁺ і Fe²⁺ в ХДМ використовували метод електронного парамагнітного резонансу (ЕПР). Фрагмент одержаного ЕПР-спектру ХДМ наведено на рис. 3.10.

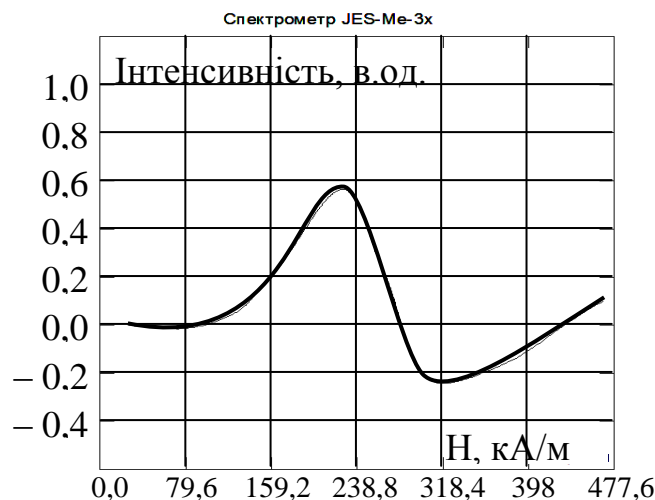


Рис. 3.10. Фрагмент ЕПР-спектру харчової добавки «Магнетофуд»

ЕПР-спектр являє собою поодинокую широку безструктурну смугу (ширина смуги на піввисоті $\Delta H \approx 67,75$ кА/м) з двома роздільними сигналами ($g_1=2,32$ і $g_2=4,19$), які зумовлені існуванням двох парамагнітних центрів: Fe³⁺ (3d⁵) і Fe²⁺ (3d⁶) відповідно [337–339, 354].

Широка смуга на ЕПР-спектрі пов'язана із сильною диполь-дипольною і обмінною взаємодією між парамагнітними центрами (катіонами Fe з вакантними 3d-орбіталями). Це вказує на досить значний потенціал ХДМ (щодо електростатичних взаємодій та комплексоутворення за рахунок координаційних зв'язків з органічною матрицею харчових систем), який підсилюється наявністю парамагнітних центрів (Fe^{3+} і Fe^{2+}), тобто магнітними властивостями ХДМ.

Як можна побачити, форма смуги ЕПР-спектру є слабо асиметричною, що характерно для однорідних систем з невисоким ступенем полідисперсності. Двократне інтегрування спектрів дозволило визначити площу під контуром поглинання, яка пропорційна масовій частці парамагнітних центрів – катіонів Fe^{3+} і Fe^{2+} у ХДМ. Сумарна масова частка Fe (II) та Fe (III) становить $(70\pm 3)\%$, що повністю збігається з результатами рентгенофлуоресцентного та спектрофотометричного методів

Таким чином, ідентифіковані хімічні елементи в НЧМ і встановлено, що основною речовиною є Fe_3O_4 ($99,5\pm 0,1\%$), $\omega(\text{Fe}_{\text{заг.}})=(72,6\pm 0,1)\%$, що на 2–4 порядку перевищує за вмістом такі елементи як S, Cr, Cl, Mn, Ni.

Вивчення кристалічної структури, морфологічних параметрів та температурних перетворень ХДМ. Стійкість НЧ Fe_3O_4 , а тому стабільність фізико-хімічних показників (ФХП) і безпечність ХДМ у процесі зберігання і функціонування в харчових системах визначається колоїдним станом та ступенем упорядкованості частинок, що взаємодіють.

За зовнішніми ознаками ХДМ характеризується полікристалічною структурою, параметри якої були визначені у зв'язку з прогнозуванням ФХП та функціонально-технологічних властивостей (ФТВ) ХДМ, а також їхньою стабільністю в процесі зберігання й кулінарної обробки.

Електронно-мікроскопічні дослідження наночастинок харчової добавки «Магнетофуд». Результати дослідження мікроструктури НЧ ХДМ методом просвічувальної електронної мікроскопії (ТЕМ) наведено на рис. 3.11.

Звідки випливає, що відбувається агрегування наночастинок ХДМ з утворенням кластерів [334, 340, 342]. При цьому добре видно, що кластери складаються з дрібних частинок, межі кожної частинки при цьому чітко видні.

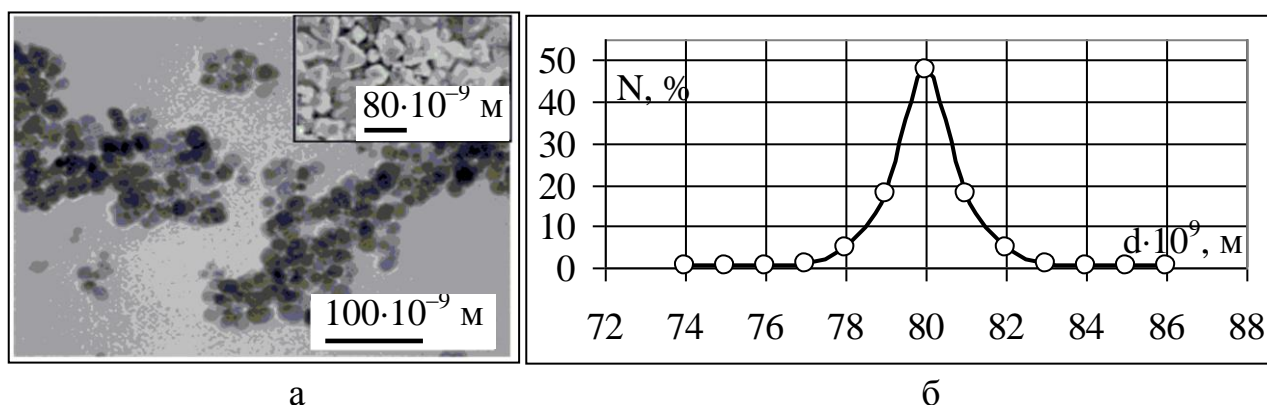


Рис. 3.11. Мікроструктура (а) та розподіл НЧ за діаметром (б) у ХДМ

Визначено, що НЧМ характеризуються досить однорідним розподілом за діаметром, близьким до монодисперсності (рис. 3.11, б). Встановлений діаметр НЧ в основній фракції: $\langle d \rangle 80$ нм. Розміри частинок ХДМ невеликі, а звідси велике відношення поверхні НЧМ до об'єму. Отже, вони мають високу поверхневу енергією і здатність до сорбції та утворювання колоїдних розчинів.

Вивчення термостабільності ХДМ. Важлива стабільність ФХП ХДМ при дії зовнішніх чинників, зокрема, високих температур. У зв'язку з цим необхідно було вивчити енергетичний баланс процесів, які відбуваються в ХДМ при різних температурах і визначають її кінцеві ФХП. Термостабільність ХДМ вивчали термографічним методом [340, 343, 344] та додаток А. 2., результати якого наведені на рис. 3.12, звідки видно, що при температурах 100°C та 135°C спостерігаються ендотермічні ефекти (згідно температурними кривими Т і ДТА), які супроводжуються значною втратою маси (криві ТГ і ДТГ) близько 5 ваг.% (86 мг). Це пов'язано з втратою води, яка була фізично сорбована у зразку ХДМ (100°C) і далі (135°C), втратою структурно-зв'язаної (кристалізаційної та хімічно-зв'язаної) води. Наступні два ендотермічні ефекти (криві Т і ДТА) спостерігаються при

температурах 255°C та 458°C. Вони практично не супроводжуються втратою маси ~ 0,6 ваг.% (8,9 мг).

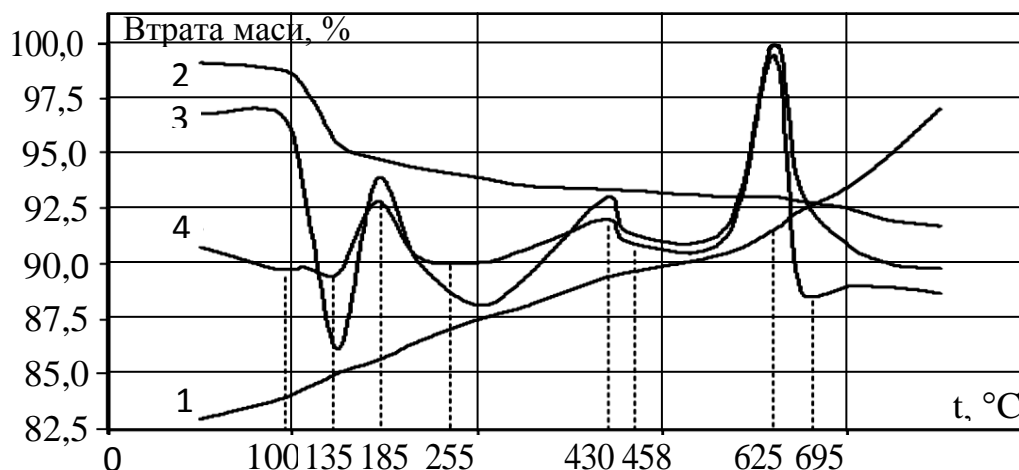


Рис. 3.12. Дериватограма ХДМ: 1–зміна температури (Т), 2–зміна маси зразка (ТГ), 3–швидкість зміни маси зразка (ДТГ), 4–термічний ефект реакції (ДТА)

Ці ефекти можуть бути пов'язані зі зміною фізичних властивостей речовини дослідного зразка (напевно електропровідності, теплопровідності або ін.) чи з незначними змінами кристалічної решітки речовини, які зумовлені дифузією атомів кисню чи іонів Fe^{2+} , O^{2-} . Екзотермічний ефект (криві Т та ДТА на рис. 3.12), який спостерігається при температурі 625°C також практично не супроводжується втратою маси (криві ТГ та ДТГ), вага знижується на 6,5 мг (~ 0,4 ваг.%). Цей факт пов'язаний з перетворенням фази подвійного Fe(II) та Fe(III) оксиду (Fe_3O_4) на метастабільний Fe(III) оксид γ – Fe_2O_3 з кубічною структурою, який виявляє феромагнітні властивості. Це добре узгоджується з літературними даними [343, 468]. При подальшому нагріві ця γ -модифікація Fe_2O_3 перетворюється у діамагнітну ромбоєдричну модифікацію (гематит). Температура перетворення 695°C (останній пік на кривій ДТА на рис. 3.12). Незначна втрата маси зразка (~8 мас.%) протягом всього температурного інтервалу може бути пов'язана з втратою вологи та дифузією іонів Fe^{2+} з Fe_3O_4 та атомів кисню у решітку α - Fe_2O_3 . Дані термогравіметричного аналізу є підтвердженням термостабільності ХДМ в широкому діапазоні температур.

Рентгенофазові дослідження кристалічної структури наночастинок ХДМ. Результати рентгеноструктурних досліджень ХДМ за методикою Брегга-Брентона [334, 340, 345, 346] наведено на рис. 3.13.

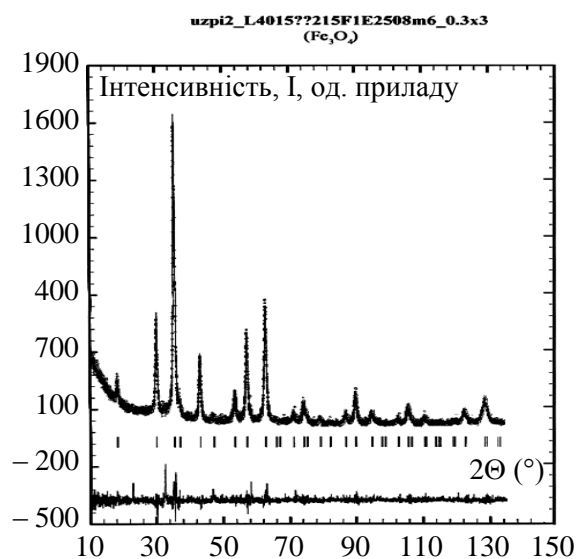


Рис. 3.13. Рентгенограма харчової добавки «Магнетофуд»

Як видно з рис. 3.13, основні смуги рентгенограми відповідають Fe_3O_4 із структурою «зворотної шпінелі»: Fe(II) катіони займають В-узли, а Fe(III) катіони розподілені між А- та В-вузлами. Звідси, уточнена формула частинок ХДМ: $\text{Fe}^{3+}[\text{Fe}^{3+}\text{Fe}^{2+}]\text{O}_4^{2-}$; параметри кристалічної решітки 0,83716(4) нм, при цьому для упорядкованого та стехіометричного Fe_3O_4 придатний параметр кристалічної решітки 0,83952(2) нм [334, 340, 345, 346]. Визначений (за рівнянням Шеррера [345, 334]) середній діаметр частинок ХДМ склав (75 ± 5) нм.

Однак, в НЧ ХДМ, на відміну від звичайного магнетиту [334, 340, 345], спостерігається зменшення d - і α - параметрів елементарної комірки, що свідчить про стиснення кристалічної решітки та напруженість кристалічної структури. На рентгенограмі також спостерігається розширення смуг, що вказує на невеликий розмір частинок ХДМ (нанорозміри) та незначну напруженість кристалічної структури. Це впливає на ФХП ХДМ, зокрема підвищує її поверхневу активність та реакційну здатність (наприклад, здатність до взаємодії зі H_2O , білками, вуглеводами, ліпідами тощо). Встановлений ефект пов'язаний з невеликим дефіцитом катіонів Fe^{3+} та Fe^{2+}

як в тетраедричних, так і в октаедричних позиціях, який можна приблизно оцінити у 5 %. Узагалі, цей ефект може бути досить важливим та цінним для модифікації біополімерних матриць та стабілізації поліфазних харчових систем. На спектрі (рис. 3.13) спостерігаються три досить чіткі смуги, які вказують на наявність незначної кількості речовини з високосиметричною кристалічною решіткою, яка може ідентифікуватися як домішка: FeO (карт. 20-138), Fe₂O₃ (карт. 29-749), Fe(OH)₃ (карт. 20-127), FeO(OH) (гетит, карт. 29-713) и Fe₃O₄ (карт. 28-162). Уточненням за методом Рітвельда було встановлено, що перші чотири фази на рентгенограмі відсутні, масова частка п'ятої фази – Fe₃O₄ у зразку ХДМ становить $(99,5 \pm 0,5) \%$.

Таким чином, унаслідок проведених досліджень з використанням методів термографічного та рентгенофазового аналізів були вивчені структура одержаної ХДМ та її температурні перетворення [334, 340, 344]. Доведено, що обрана технологія хімічної конденсації дозволяє одержувати частинки ХДМ нанорозмірного діапазону, без домішок, з правильними параметрами кристалічної решітки, тобто з необхідними та стабільними ФХП, які є підґрунтям для формування функціонально-технологічних властивостей ХДМ.

Вивчення магнітних характеристик ХДМ. Включені до складу харчових продуктів магнітні НЧ ХДМ можуть впливати на електромагнітні властивості харчової системи з точки зору обробки в зовнішніх електромагнітних полях: високих (ВЧ) і надвисоких (НВЧ) частот. Тому були вивчені магнітні властивості НЧ ХДМ з метою потенціалу технологічної обробки в електромагнітних полях. Досліджували залежність величини намагніченості (I) від напруги магнітного поля (H): $I=f(H)$ для різних дослідних зразків ХДМ (Fe₃O₄) (рис. 3.14 та додаток А. 13), звідки видно, що для дослідних зразків 1, 2 відбувається поступове збільшення величини намагніченості (I, кА/м) при збільшенні напруги зовнішнього магнітного поля (H, кА/м), при цьому величина намагніченості насичення для цих зразків становить: 329 кА/м та 338 кА/м відповідно. Для неподрібненого монокристалу Fe₃O₄ I=475 кА/м. Така значна різниця (майже 28 %) у

значеннях намагніченості насичення Fe_3O_4 зумовлена значною площею відкритих поверхонь у високодисперсних зразках, на яких відбувається зміна магнітних параметрів:

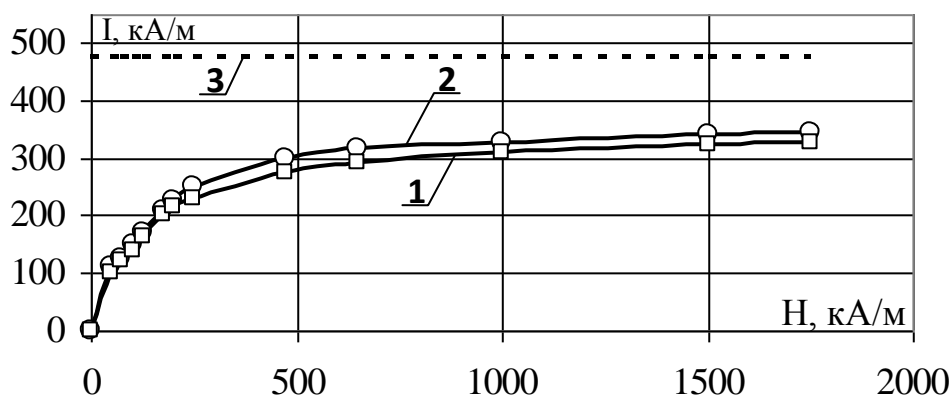


Рис. 3.14. Криві намагніченості частинок Fe_3O_4 : 1 – подрібнений монокристалічний (МНК) зразок; 2 – ХДМ; 3 – неподрібнений МНК зразок

зміна ефективної магнітної анізотропії, «скошення» магнітної структури (відхилення магнітних моментів атомів від кристалографічної осі) на поверхні частинок і прилеглих шарах, термічні флуктуації магнітних моментів частинок з об'ємом, близьким до критичного V_{so} . Ці явища відмічалися багатьма авторами [488–490] та є підтвердженням високого хімічного потенціалу приповерхневого шару НЧ ХДМ.

Таким чином, визначено низку фізичних показників ХДМ таких як: магнітні та парамагнітні властивості, структурні (кристалічні) характеристики та їх залежність від температури. Встановлено, що перелічені показники мають стабільні величини при нагріванні до температури $(350 \pm 5)^\circ\text{C}$.

3.5. Вивчення поверхневої активності ХДМ

Вивчення електроповерхневих властивостей ХДМ у колоїдних системах різної природи. Стійкість харчових колоїдних систем може бути оцінена величиною “ ξ -потенціалу”, який виникає при седиментації частинок. Значення ξ -потенціалу залежить від властивостей поверхні частинок та середовища. Для НЧ високий ξ -потенціал ($>30\text{мВ}$) буде означати стійкість колоїдної системи до агрегації. Встановлення величини ξ -потенціалу

колоїдних систем різного складу є одним з методів дослідження їх властивостей, зокрема стабільності [262, 491–494]. Структура агрегатів колоїдної частинки ХДМ (Fe_3O_4) у полярному дисперсійному середовищі такому як вода містить декілька шарів [262, 354] (рис. 3.15):

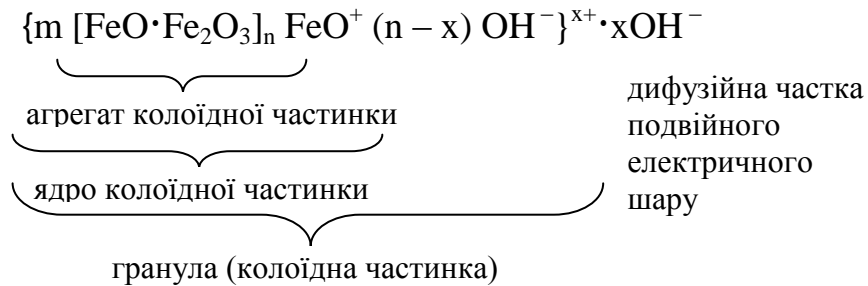


Рис. 3.15 Структура агрегатів колоїдної частинки ХДМ (Fe_3O_4) з водою

Результати визначення ξ -потенціалу у дослідних зразках колоїдних систем з додаванням ХДМ наведені в табл. 3.5 та додаток А.14.

Таблиця 3.5

Електрокінетичні потенціали дослідних зразків колоїдних систем з наночастинками (НЧ) харчової добавки Магнетофуд» ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)

Дослідні зразки колоїдних систем з НЧ «Магнетофуд»	ζ -потенціал, мВ
На водяній основі: $\text{FeO} \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{H}_2\text{O}$ – зразок 1	$33,8 \pm 1,2$
На 3 % розчині HCl : $\text{FeO} \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{Cl} \text{H}_2\text{O}$ – зразок 2	$41,6 \pm 1,8$
На 3% розчині олеата Na : $\text{FeO} \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{C}_{18}\text{H}_{33}\text{O}_2\text{Na} \text{H}_2\text{O}$ – зразок 3	$42,7 \pm 1,8$
На 3% розчині пектину: $\text{FeO} \text{Fe}_2\text{O}_3 (\text{C}_{13}\text{H}_{14}\text{O}_{13})_n \text{H}_2\text{O}$ – зразок 4	$43,2 \pm 1,9$
На 3% розчині яєчного білку: $\text{FeO} \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{альбумін} \text{H}_2\text{O}$ – зразок 5	$44,2 \pm 1,9$

З даних табл.3.5 видно зростання сумарного ξ - потенціалу в дослідних зразках (2–5) дисперсних систем в 1,2...1,3 раза порівняно зі зразком 1 («магнетофуд+вода»). При цьому ξ -потенціали в усіх системах (зразки 1–5) мали досить високі значення. Саме це визначає можливість стабілізації дисперсних систем (на основі полісахаридів, білків, жирних кислот тощо) наночастинками ХДМ. Ефективність стабілізації дисперсних систем НЧМ пояснюється утворенням подвійного електричного шару (ПЕШ) на їх поверхні [123].

У випадку використання розчину HCl ПЕШ утворюється за схемою (3.7):



Хлорид-іон порівняно з гідроксид-іонами має більшу молекулярну масу та більшу величину негативного заряду, зумовленого кількістю електронів в структурі Cl^- . Це сприяє абсорбції хлорид-іонів та веде до збільшення кількості негативно заряджених іонів на поверхні частинки ХДМ. У випадку використання розчинів натрій олеату, пектину або яєчного білка утворюється структура міцели [262] (рис. 3.16):

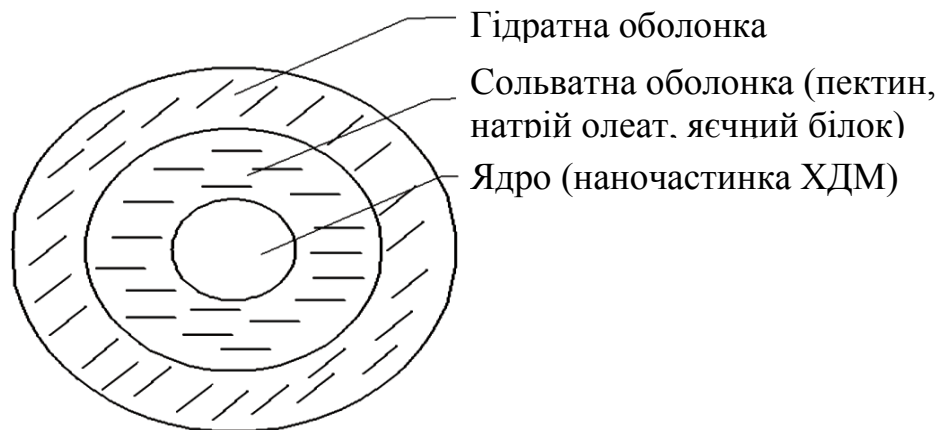


Рис. 3.16. Схематичне зображення структури міцели

ПЕШ на поверхні частинок ХДМ сприяє збільшенню стійкості колоїдних систем з розчином натрій олеату, пектину і яєчного білку (рис. 3.17).

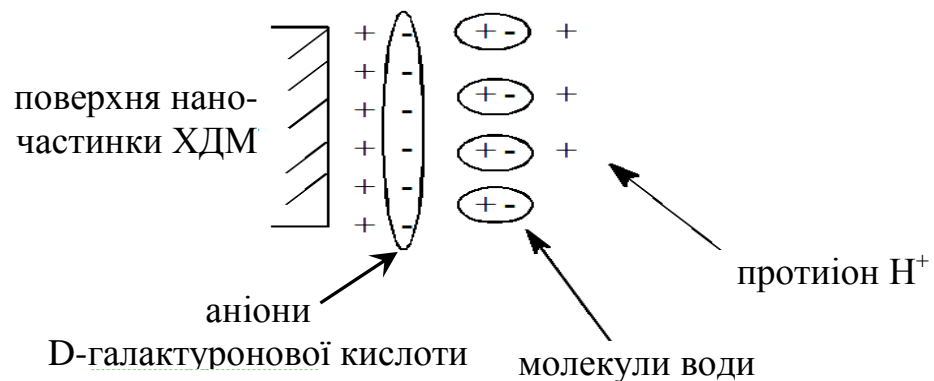


Рис. 3.17. Структура ПЕШ на поверхні НЧМ з пектином (3% розчин)

Так, у системі з використанням пектину (аніонний поліелектроліт) наночастинки ХДМ адсорбуються на межі розподілу фаз, утворюючи мономолекулярний сольватний шар із цих аніонів навколо дисперсної фази (твердих НЧ) [262]. Навколо цього шару орієнтуються молекули води, утворюючи гідратну оболонку, при цьому знижується поверхневий натяг на

межі розподілу фаз, що веде до збільшення агрегативної стійкості колоїдної системи. Крім того, за рахунок дії кулонівських сил відштовхування однаково заряджених аніонів відбувається їх дезагрегування та зниження величини сили тертя між ними. Це приводить до збільшення стійкості дисперсної системи та пояснює збільшення величини її ξ -потенціалу, а також сприяє просторовому структуруванню колоїдних частинок [262].

Дослідження седиментаційної та агрегативної стійкості колоїдних систем з ХДМ. Фізична густина наночастинок ХДМ з огляду на те, що ХДМ має кристалічну структуру, вища за густину води, тому її поведінка у суспензіях, що знаходяться у полі сил тяжіння або у відцентровому полі, буде впливати на седиментаційну та агрегативну стійкість харчових колоїдних систем [354]. На рис. 3.18 наведені криві седиментації для дослідних зразків дисперсних систем (1–5).

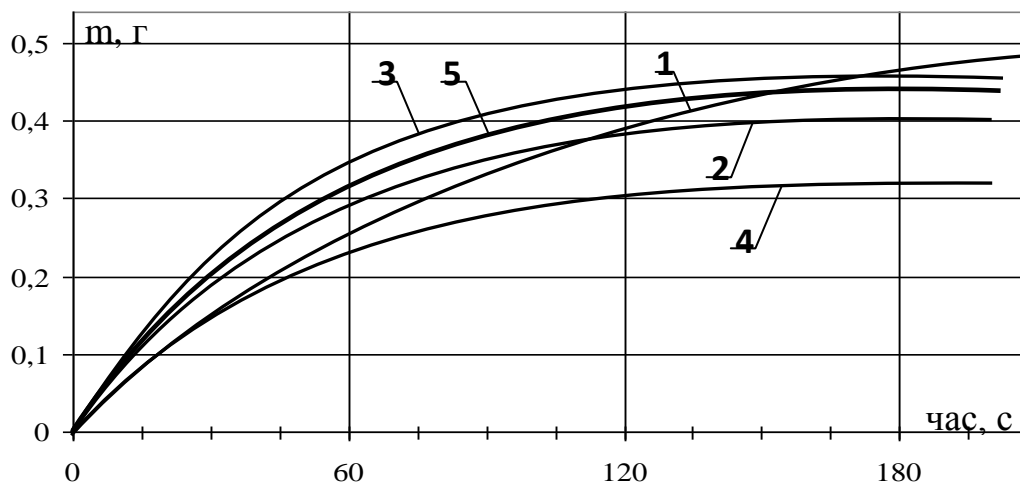


Рис. 3.18. Криві седиментації дослідних зразків дисперсних систем з НЧМ: 1—«вода+магнетофуд»; 2—«НСІ+магнетофуд»; 3—«олеат натрію+магнетофуд»; 4—«пектин+магнетофуд»; 5—«яєчний альбумін+магнетофуд»

Як видно з рис. 3.18, криві (2–5) мають схожий характер залежності. За першу хвилину дослідження відбувається зростання маси осаду (седиментація частинок), після чого спостерігається майже відсутність змін маси осаду. Тобто констатується стабілізація процесу седиментації для дослідних зразків (2–5). Відмічається, що досягнення стабілізації з втратою

найменшої маси частинок дисперсної фази (ХДМ) відповідає зразку 4, який містить розчин пектину. Крива залежності 1 (зразок 1) характеризується меншою стабільністю, тобто ХДМ з білками, солями жирних кислот, полісахаридами утворює стабільні дисперсні системи. На основі кривих седиментації встановили розподіл частинок дисперсної фази за розміром [354] (табл. 3.6).

Таблиця 3.6

Середній розмір та ступінь агрегації частинок дисперсної фази дослідних зразків дисперсних систем з використанням ХДМ

Дослідні зразки дисперсних систем	Середній розмір частинок, нм / Ступінь агрегації, %		
	1 доба	7 діб	60 діб
Зразок 1	109±5,3/12,0±0,5	109±5,3/12,4±0,5	109±5,3/12,9±0,5
Зразок 2	106±5,1/10,0±0,5	106±5,1/10,7±0,5	106±5,1/10,9±0,5
Зразок 3	110±6,0/14,0±0,7	110±6,0/14,4±0,7	110±6,0/14,7±0,7
Зразок 4	110±6,0/13,0±0,6	110±6,0/13,3±0,6	110±6,0/13,6±0,6
Зразок 5	110±6,0/14,0±0,7	110±6,0/14,3±0,7	110±6,0/14,8±0,7

Як видно з табл. 3.6, у дослідних зразках (1, 3–5) протягом 60 діб не спостерігалось змін у розмірі агрегатів дисперсної фази. Незначне зменшення розміру агрегатів для зразка 2 (в 1,03 рази) порівняно зі зразками (1, 3–5) відбувається за рахунок дії НСІ на поверхню наночастинки ХДМ та стравлення невеликої ділянки приповерхневого шару НЧ [334, 495].

Аналізом диференціальних та інтегральних кривих розподілу частинок дисперсної фази встановлено, що частинки ХДМ, які осаджуються, мають розмір 100...120 нм та є агрегатними угрупованнями більш дрібних частинок.

За даними седиментаційного аналізу були встановлені величина константи седиментації ($S_{\text{сед}}$) та кінетичної седиментаційної стійкості (КСС) дослідних зразків дисперсних систем (табл. 3.7). Порівнюючи одержані дані седиментаційного аналізу, зазначаємо зростання $S_{\text{сед}}$ та КСС для зразків 2–5 порівняно зі зразком 1.

Використання ХДМ у дисперсних системах сприяє збільшенню кінетичної стійкості за рахунок електростатичної та координаційної взаємодії НЧМ з полярними та іоногенними групами дисперсійного середовища.

Таблиця 3.7

Результати седиментаційного аналізу дослідних зразків дисперсних систем з використанням харчової добавки «Магнетофуд» (ХДМ)

Дослідні зразки дисперсних систем	$S_{\text{сед.}}$	КСС	$S_{\text{ср. фр.}}$	$КСС_{\text{ср. фр.}}$
Зразок 1	$0,07 \pm 0,01$	$5,68 \pm 0,3$	$0,08 \pm 0,01$	$5,89 \pm 0,3$
Зразок 2	$0,10 \pm 0,01$	$9,74 \pm 0,4$	$0,10 \pm 0,01$	$9,82 \pm 0,4$
Зразок 3	$0,11 \pm 0,01$	$10,40 \pm 0,5$	$0,11 \pm 0,01$	$10,61 \pm 0,5$
Зразок 4	$0,13 \pm 0,02$	$10,42 \pm 0,5$	$0,13 \pm 0,02$	$10,63 \pm 0,6$
Зразок 5	$0,14 \pm 0,02$	$10,39 \pm 0,6$	$0,12 \pm 0,02$	$10,54 \pm 0,6$

Це приводить до просторового структурування та стабілізації колоїдної системи. При цьому найкращі показники стійкості має дисперсна система «пектин+магнетофуд» за рахунок утворення аморфного шару на поверхні НЧМ з подальшим просторовим структуруванням і збільшенням в'язкості дисперсійного середовища. Для встановлення характеру адсорбційної взаємодії молекул дисперсійного середовища з ХДМ були проведені ІЧ-спектроскопічні дослідження [354, 340] та додаток А.2, зокрема для дисперсної системи «олеат натрію+Магнетофуд» (зразок 4) (рис. 3.19).

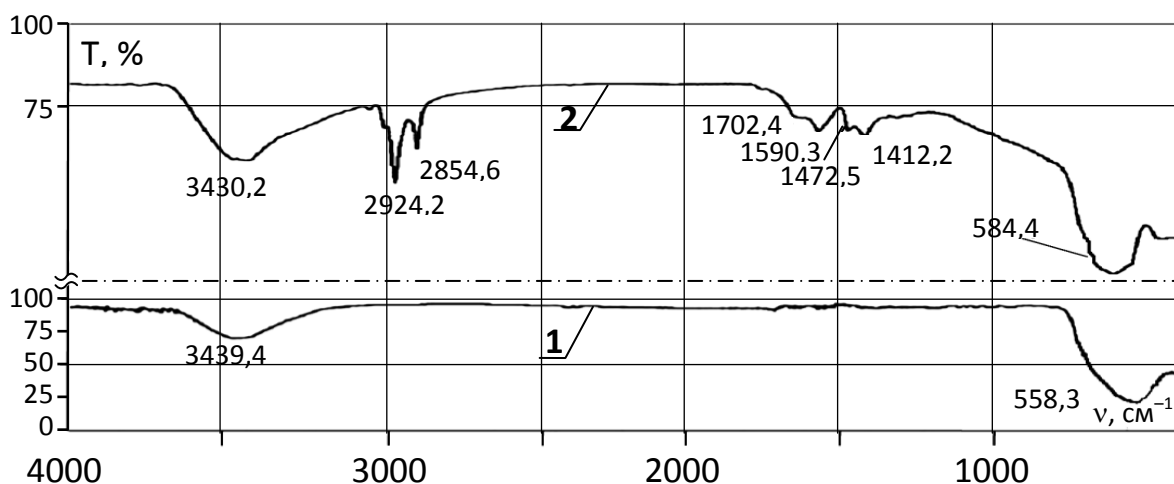


Рис. 3.19. ІЧ-спектри поглинання: 1 – ХДМ; 2 – дисперсної системи «олеат натрію+Магнетофуд»

Як видно з рис. 3.19, у спектрі 2 «олеат натрію+магнетофуд» смуга поглинання в області $1702,4 \text{ см}^{-1}$ відповідає валентним коливанням (ν) групи $\text{C}=\text{O}$ ($\nu_{(\text{C}=\text{O})}=1710 \text{ см}^{-1}$ у незбудженому стані), що пов'язане з хемосорбцією олеату натрію на поверхні частинок ХДМ. Також у цьому зразку спостерігаються смуги поглинання натрій олеату: $\nu_{(\text{C}=\text{C})}=1472,5 \text{ см}^{-1}$, $\nu_{(\text{C}-\text{H})}=1412,2 \text{ см}^{-1}$, $\nu_{(\text{C}-\text{H}\beta)}=2924,2 \text{ см}^{-1}$ та $\nu_{(\text{C}-\text{H}\gamma)}=2854,6 \text{ см}^{-1}$. Наявність широкої смуги поглинання середньої інтенсивності для спектра (1) та високої інтенсивності для спектра (2) у діапазоні $(3200-3600) \text{ см}^{-1}$, пов'язана з коливаннями поверхневих OH -груп, що підтверджує наявність адсорбованих на поверхні частинок ХДМ гідроксо-груп [357]. Тому при взаємодії ХДМ з олеатом натрію (а також жирними кислотами) відбувається часткове заміщення OH -груп карбоксилат-іонами з утворенням зв'язку $\text{Fe}-\text{O}$ [340, 341], що зазначалося багатьма авторами [357, 358]. На спектрі (1) присутня смуга поглинання зв'язку $\text{Fe}-\text{O}$: при $\sim 558,3 \text{ см}^{-1}$, що добре погоджується з даними літературних джерел 560 см^{-1} [357, 359]. Зсування цієї смуги поглинання у спектрі 2 в область $\sim 584,4 \text{ см}^{-1}$ пов'язано з впливом молекул натрій олеату – їх втручанням у приповерхневий шар НЧМ та хімічною взаємодією з катіонами ферума. Отже, стабільність колоїдних систем пояснюється хемосорбцією молекул дисперсійного середовища на поверхні частинок дисперсної фази – ХДМ з подальшим просторовим структуруванням.

Таким чином, експериментально встановлено механізм седиментаційної та агрегативної стійкості колоїдних (дисперсних) систем з використанням НЧМ як дисперсної фази [354]. Експериментальним шляхом з'ясовано, що колоїдні системи на основі розчинів пектину, натрій олеату, яєчного білка, хлоридної кислоти та НЧМ мають більшу седиментаційну та агрегативну стійкість порівняно з дисперсійними системами НЧМ на водній основі.

Дослідження стійкості та дисперсності жирових суспензій з використанням ХДМ. Відповідно до концепції роботи, яка передбачає коригування ФТВ харчових систем, зокрема жирових суспензій, шляхом введення НЧ оксидів заліза з певними ФХП, виникла необхідність у дослідженнях, що пов'язані з визначенням стабільності жиру-магнетофудових суспензій та характеру взаємодії НЧМ з жирами.

У роботі досліджували жирові суспензії (ЖС) ХДМ, що одержували за розробленою технологією [264, 265, 434, 438, 443, 495, 496], у яких ХДМ використовувалася як дисперсна фаза, а як дисперсійне середовище – олії та жири: олія соняшникова рафінована дезодорована (ОСРД); олія кукурудзяна нерафінована ОКН); олія соєва нерафінована (ОСН); жир свинячий топлений (ЖСТ); жир яловичий топлений (ЖЯТ); саломас нерафінований для маргаринової промисловості (СНМП); замінник молочного жиру «Віолія-Молжир 3» (ЗМЖ ВМ); кондитерський жир «Шортенінг» (КЖШ). У попередніх дослідженнях ми розробили спектрофотометричну методику визначення стійкості та дисперсності ЖС [267–260, 354] та додатки А.11 й А.12.

Результати вимірювання коефіцієнту пропускання ($T, \%$) в залежності від довжини хвилі світла (λ, nm) у часі для соєво-магнетофудової суспензії наведено на рис. 3.20.

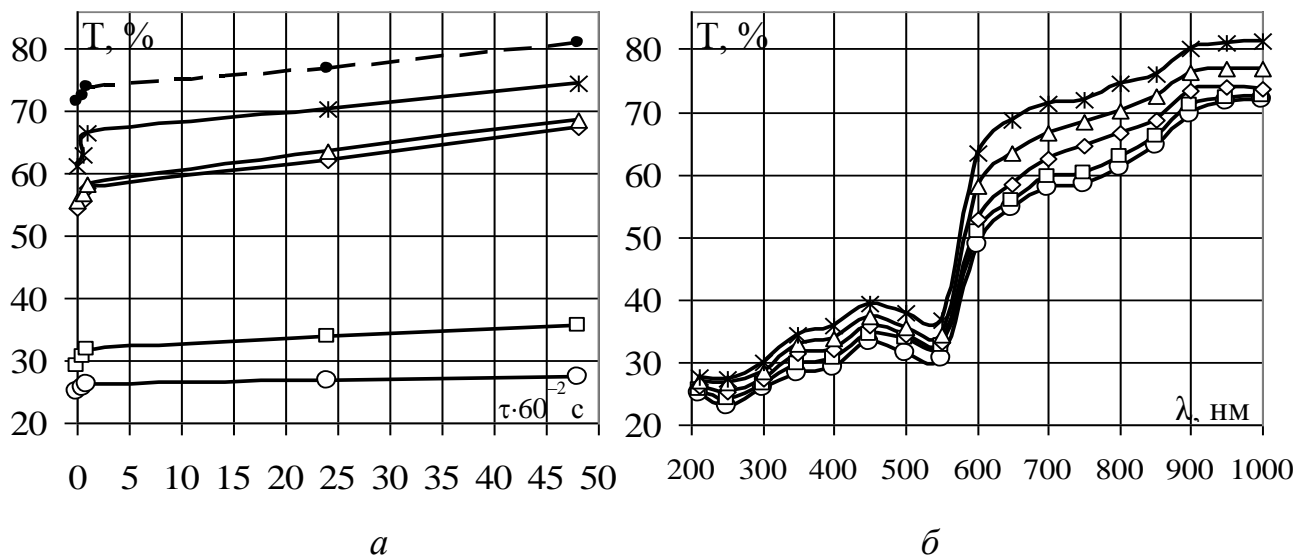


Рис. 3.20. Залежність коефіцієнту пропускання соєво-магнетофудової суспензії: *а* – від довжини хвилі світла, λ, nm (—○—210, —□—400, —◇—600, —△—650, —*—800); *б* – від часу витримки суспензії, τ, s (—○—0 с, —□—0,5, —◇—1,0, —△—24,0, —*—48,0)

Як видно з експериментальних даних (рис. 3.20, а), з плином часу та зростанням довжини хвилі спостерігається поступове збільшення коефіцієнта пропускання з 25 % (210 нм) до 71,9 % (1000 нм) при 0 год витримки ЖС; з 27,5 % (210 нм) до 81,2 % (1000 нм) при максимальному часі витримки ЖС (48 год). Крім того, найбільша зміна коефіцієнта пропускання ($\Delta T, \%$) з плином часу (рис. 3.20, б) спостерігається при довжинах хвиль 600 нм та 650 нм (30,7 і 25,8 %) відповідно. При інших довжинах хвиль ΔT дорівнювало приблизно 18,4 %. Тому визначення стійкості ЖС проводили при $\lambda=600$ нм. Встановлено, що досліджені ЖС мають достатню седиментаційну та агрегативну стійкість, при цьому раціональне співвідношення компонентів у суспензії дорівнює: жир:ХДМ=50мас.:%:50мас.%. Фотометричним та мікроскопічним методами визначено діаметр частинок в дослідних зразках ЖС (рис. 3.22) [264, 265, 268, 269] – середній діаметр (у основній фракції) становить $\langle d \rangle (83 \pm 1)$ нм.

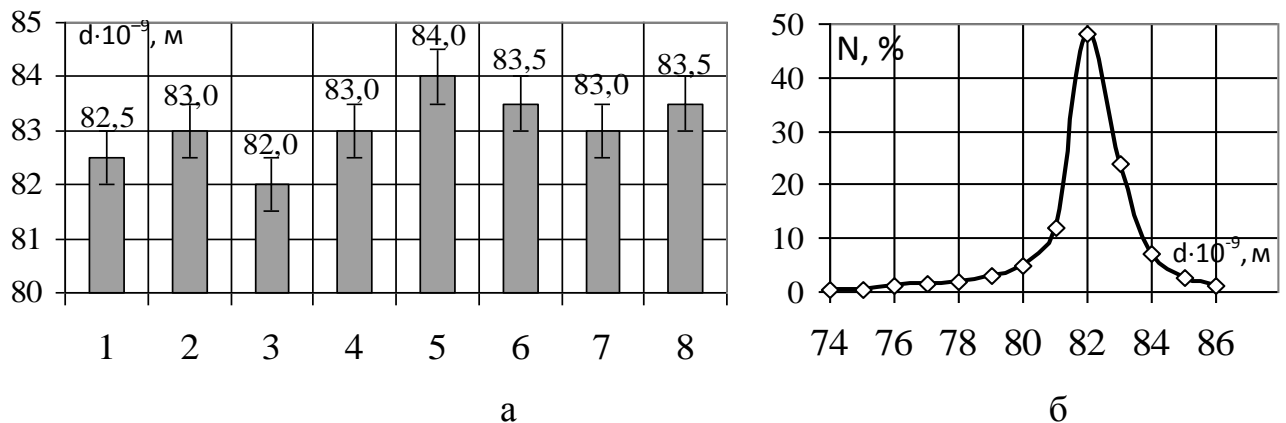


Рис. 3.21. Діаметр частинок ХДМ (а) в ЖС різного складу (1 – ОСРД, 2 – ОКН, 3 – ОСН, 4 – ЖСТ, 5 – ЖЯТ, 6 – СНДМП, 7 – ЗМЖ ВМ, 8 – КЖШ) та розподіл частинок ХДМ за діаметром (б) в соєво-магнетофудової суспензії

Використовуючи діаметр частинок ХДМ у ЖС, знайшли їх кількість в 1 см^3 ЖС (концентрацію) [44, 45, 105]. Результати визначення константи седиментації ($S_{\text{сед.}}$) та кінематичної седиментаційної стійкості (КСС) у дослідних зразках ЖС (за законом Стокса) наведені на (рис. 3.22, а); кількості частинок ХДМ в 1 см^3 ЖС (при зберіганні протягом 48 год) – (рис. 3.22, б). Встановлено (рис. 3.22, а), що за 48 год зберігання зразків ЖС незначно зменшилися: $S_{\text{сед.}}$ на 2,0...2,5%, КСС на 1,1...1,2%; (рис. 3.22, б) кількість

частинок ХДМ в 1 см^3 ЖС на $2,7 \dots 3,0\%$ (з $(1,42 \dots 1,44) \cdot 10^{12}\text{ см}^{-3}$ до $(1,38 \dots 1,40) \cdot 10^{12}\text{ см}^{-3}$).

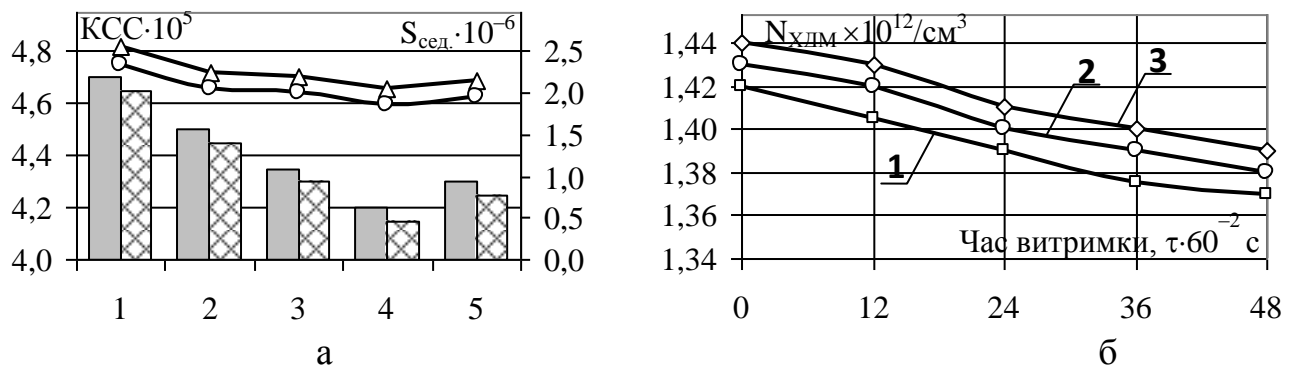


Рис. 3.22. Стійкість (\square —початкова КСС, \boxtimes —кінцева КСС; \triangle —початкова $S_{сед.}$, \circ —кінцева $S_{сед.}$) (а) та концентрація ($N_{хдм} \times 10^{12} / \text{см}^3$) (б) жироманетофудових суспензій (час зберігання 48 год, $t=18 \dots 22^\circ\text{C}$): а – жири (1 – ЖСТ, 2 – ЖЯТ, 3 – СНДМП, 4 – ЗМЖ ВМ, 5 – КЖШ); б – олії (1 – ОСРД, 2 – ОСН, 3 – ОКН)

Це підтверджує можливість використання ХДМ до утворення стійких ЖС. Беручи до уваги значення в'язкості дисперсійного середовища (жирів та олій), невеликі розміри частинок ХДМ (дисперсної фази) вважаємо доцільним використовувати ХДМ як поверхнево-активну речовину, якій притаманна стабілізувальна дія. Цій ефект можна пояснити таим чином: з точки зору колоїдної хімії ЖС – високодисперсні ліофобні системи, які мають нерозчинне ядро (наночастинки ХДМ) [111, 436, 469]. Поверхня ядра несе певний заряд, завдяки якому формується ПЕШ. Це є формою стабілізації для жиродисперсних колоїдних систем, як у нашому випадку. Хоча й цей вид стабілізації не є досить сильним. Однак поряд з цим існує інший вид стабілізації, який може бути оцінено за реологічними властивостями – структурно-механічний фактор стійкості (СМФС), що пов'язаний зі структуроутворювальною дією НЧМ.

Також обгрунтовано можна констатувати, що використання твердих жирів як дисперсійне середовище та НЧМ при створенні колоїдних суспензій, дозволяє одержати систему, якій притаманні високі показники седиментаційної стійкості. Структурно-реологічні властивості твердих жирів та малий розмір частинок ХДМ (дисперсної фази) $70 \dots 80$ нм дозволяють

одержати стійку систему, використовуючи СМФС (згідно з теорією «еластичності-пружності» за П. О. Ребиндером).

При технологічному використанні ХДМ у вигляді ЖС слід приділяти увагу питанням адсорбції молекул жиру на частинках ХДМ. Від характеру зв'язку в системі адсорбент-адсорбат залежать ФТВ харчових колоїдів. У випадку хемосорбції молекул жиру на частинках ХДМ може бути одержана агрегативно стійка колоїдна суспензія. Якщо стабілізація наночастинками ХДМ відбувається за рахунок сил фізичної адсорбції, у колоїдних суспензіях можливі процеси десорбції молекул жиру та коагуляції частинок дисперсної фази – ХДМ [353].

Тому в роботі визначалися типи взаємодії НЧМ з жирами та жирними кислотами [340,341]. Для цього був використаний метод ІЧ-спектроскопії [266, 342], за допомогою його було встановлено, що в ЖС між частинками ХДМ та жирами спостерігається хімічна взаємодія (хемосорбція). Тобто використання ХДМ сприяє просторовому структуруванню та стабілізації колоїдних суспензій.

Дослідження поверхнево-активних властивостей ХДМ. Слід зазначити, що утворення харчових поліфазних систем емульсійного, суспензійно-емульсійного, піно- і гелеподібного типу (фруктові та овочеві соки, супи, сиркова маса, ковбасний фарш, молоко, вершки, майонез, креми, желе, вершкове масло, маргарин та ін.), тобто взаємодія рідких або твердих з рідкою фазами супроводжується механізмами упорядкування розчинника (полярного чи неполярного) на поверхнях контакту з іншою протилежною фазою. Цей механізм має суттєву ентропійну складову, й зазвичай приріст ентропії має негативний знак. Але згідно з принципами стійкості колоїдних систем енергія Гіббса містить і ентальпійний фактор. Тобто частина енергії взаємодії повинна розсіюватись на споріднених зв'язках між поверхнями або молекулами. Цьому сприяють так звані поверхнево-активні речовини, які містять полярні та неполярні групи одночасно. НЧМ у цьому випадку можуть здійснювати значний вплив на протікання цих механізмів.

Поверхневу активність ХДМ визначали методом Дю-Нуї [38]. Розчини для дослідження містили 0,01 мас. % суміші поверхнево-активних речовин (ПАР) у равних масових частках або окремої ПАР. Результати досліджень представлені в табл. 3.8.

Таблиця 3.8

**Поверхневий натяг колоїдних розчинів дослідних зразків
поверхнево-активних речовин**

Поверхнево-активні речовини	Поверхневий натяг, мН/м			
	Розчинник			
	H ₂ O	0,05н NaCl	70% етанол	1% ДДС-Na
Розчинник	72,8±4,1	74,0 ±4,1	28,9 ±1,4	39,0 ±2,1
ХДМ	65,0 ±3,4	63,0 ±3,4	28,5 ±1,3	38,2 ±2,1
Вискоетерифікований пектин (ВЕ пектин)	72,7 ±3,4	73,8 ±3,4	28,8 ±1,4	38,9 ±2,1
Агар	71,7 ±3,4	73,2 ±3,4	28,9 ±1,4	38,5 ±2,1
ХДМ + ВЕ пектин	69,8±3,4	69,9 ±3,4	28,8 ±1,4	38,1 ±2,1
ХДМ + агар	67,5 ±3,4	67,8 ±3,4	28,7 ±1,3	38,0 ±2,1
Яечний альбумін (ЯА)	51,0 ±2,7	48,0 ±2,4	28,6 ±1,3	35,0 ±2,0
Яечний альбумін + ХДМ	53,0 ±3,1	50,5 ±3,1	28,5 ±1,3	34,0 ±2,0
ЯА + ХДМ + ВЕ пектин	58,0 ±3,1	60,0 ±3,2	29,7 ±1,4	36,8 ±2,0
ЯА + ХДМ + агар	53,5 ±3,1	51,0 ±2,7	29,5 ±1,4	35,6 ±2,0

З даних табл. 3.8 видно, що складова зменшення поверхневого натягу (ПН) полярних розчинників від додавання наночастинок ХДМ більша, ніж у полісахаридів та менша, ніж у яєчного альбуміну. Це пов'язано з різними механізмами ефекту зменшення ПН: для макромолекул яєчного альбуміну - це розрізнення поверхні розділу, а для наночастинок ХДМ механізм може бути реалізований через певну поляризованість приповерхневих шарів розчинника біля НЧ. Це має непряме підтвердження факту наявності достатнього ξ -потенціалу. При додаванні ХДМ до розчинів 70 % етанолу і 1% ДДС-Na величина ПН колоїдних розчинів знижувалася значно менше, ніж у воді або сольовому розчині, – всього лише на 1,4 % та 1,3 % відповідно порівняно з вихідними розчинниками. Отже, гідрофобні властивості у ХДМ виражені менш яскраво, ніж гідрофільні. У цілому ж ХДМ менш поверхнево

активна – на 19...25%, ніж яєчний альбумін, який схильний до водневих, іонних і гідрофобних взаємодій.

ПН в колоїдних системах «полісахарид+магнетофуд» як у водних, так і сольових розчинах зменшувався 3,0...4,5% порівняно з чистим розчинником, що вказувало на взаємодію між наночастинками ХДМ і полісахаридом за рахунок нековалентних зв'язків. Аналогічна динаміка спостерігалася і в колоїдній системі «яєчний альбумін+магнетофуд». У колоїдних системах «полісахарид+магнетофуд» і «яєчний альбумін+магнетофуд» в 70% розчині етанолу ПН практично однаковий з натягом відповідних полісахаридів (або яєчного альбуміну), а в 1% розчині ДДС-На ПН знизився на 2,9% – в системі «агар+магнетофуд» і «яєчний альбумін+магнетофуд». Отже, в цих колоїдних системах гідрофобні властивості ХДМ менш виражені, ніж у яєчного альбуміну. Це знову свідчить про те, що в системах «полісахарид+магнетофуд» і «яєчний альбумін+магнетофуд» гідрофобні взаємодії менш значні, ніж гідрофільні, за рахунок водневих і іонних зв'язків. У колоїдних системах «яєчний альбумін+полісахарид+магнетофуд» ПН в воді і сольовому розчині підвищувався порівняно з системою «яєчний альбумін+магнетофуд» на 1,0%; в 70% розчині етанолу – на 3...4% і в 1% розчині ДДС-На – на 4,7...8,2%.

Таким чином, ХДМ має хімічну поверхневу активність, яка проявляється в електростатичних і координаційних взаємодіях з різними речовинами: білками, вуглеводами. Тому введення ХДМ у харчові поліфазні системи уповільнює процеси руйнування електростатичних взаємодій, сприяючи формуванню нових зв'язків, що визначає можливість стабілізації дисперсних систем (емульсій, суспензій, пін).

Дослідження дифільності (амфіфільності) ХДМ. З метою перевірки гіпотези про наявність у ХДМ дифільних властивостей визначали крайові кути змочування поверхні спресованої ХДМ краплею води (рис. 3.23, а) і краплею соняшникової олії (рис. 3.23, б) методом «миттєвої зйомки».

Для зразка ХДМ з краплею води крайовий кут змочування на $(15\pm 1)^\circ$ менше, тобто спорідненість ХДМ до води проявляється дещо більшою мірою

(причому в обох випадках $\Theta < 90^\circ$), що підтверджує наявність у ХДМ спорідненості, як до води, так і до олії.

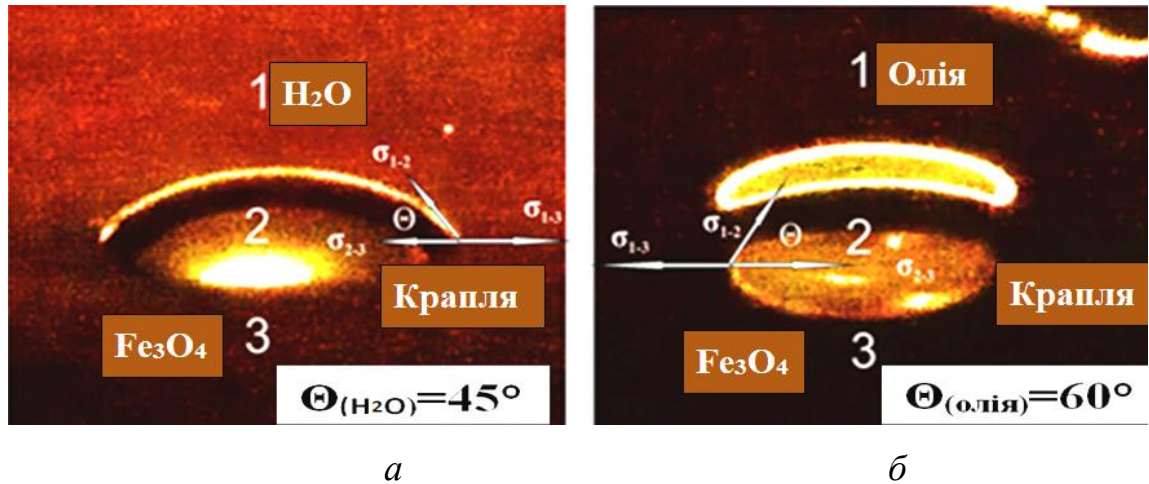


Рис.3.23. Результати визначення крайових кутів змочування поверхні ХДМ: а – краплею води; б – краплею соняшникової олії

Тобто ХДМ притаманні амфіфільні властивості, тому і здатність до утворення різних надмолекулярних структур: моношарів, міцел, ліпосом, іншими словами, здатність до гелеутворення.

Ефект зміни стану поверхні та поведінки наночастинок ХДМ у кислому середовищі. Поверхня наночастинок ХДМ може активно вступати у взаємодію з різними фазами. Особливу увагу приділено взаємодії з рідкими фазами, що може приводити до сольватації, набухання, розчинення або дифузії наночастинок ХДМ. Дослідженнями кінетики розчинення ХДМ у рідкому середовищі (рН=1,5...9,0) (додаток А. 33) та [334, 363, 377] встановлено її обмежена розчинність: масова частка ХДМ, яка перейшла у розчин: HCl з рН = 1,5 становить $\omega = 9,3 \%$; з рН = 5,0 – $\omega = 0,3 \%$; NaOH з рН=9,0 – $\omega = 0,01 \%$. З кінетичних кривих $\lg C_{(\text{Fe}^{3+})} = f(t)$ (рис. 3.24) розчинення наночастинок ХДМ спектрофотометричним, гравіметричним та атомно-абсорбційним методами видно, що вони складаються з двох лінійних ділянок з різним кутом нахилу, тобто криві описують кінетичні рівняння реакцій I-го порядку та мають різні швидкості і механізми процесу розчинення наночастинок ХДМ, зумовлені товщиною і станом поверхні шару наночастинок (НЧ), який розчиняється.

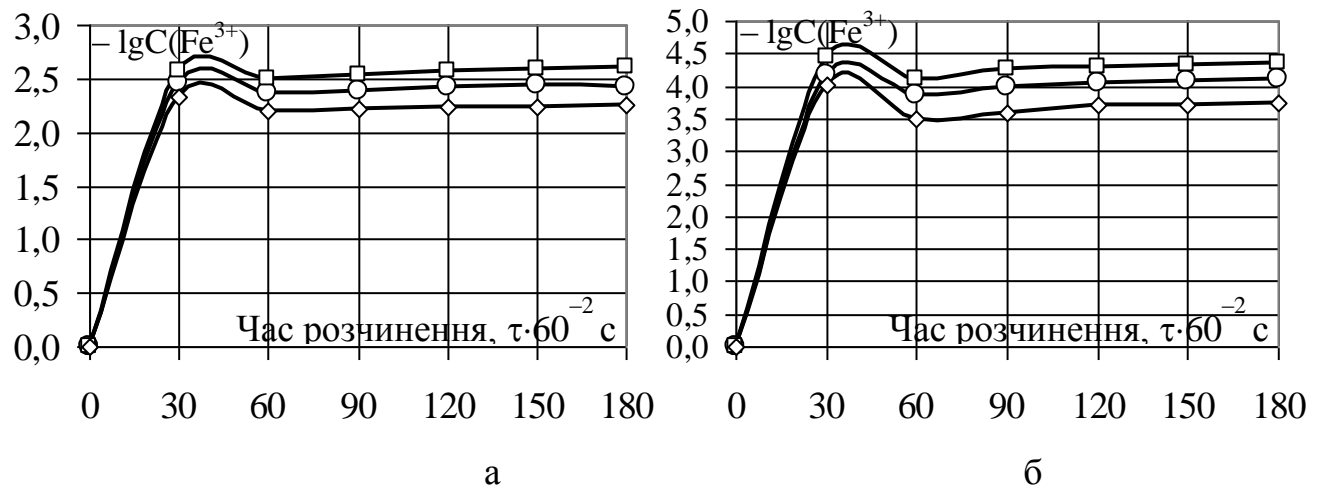


Рис. 3.24. Кінетичні криві процесу розчинення наночастинок ХДМ у середовищі розчину HCl: а – рН=1,5; б – рН=5,0 (—○— – спектрофотометричний, —□— – атомно-абсорбційний, —◇— – гравіметричний методи)

Перший механізм характеризується першою лінійною ділянкою на кінетичних кривих, великим кутом нахилу і більшою швидкістю. Він зумовлений розчиненням приповерхневого дефектного і нерівного шару НЧМ. У результаті площа поверхні НЧ, яка взаємодіє з розчином HCl, більша, а значить, швидкість розчинення вища порівняно з другою ділянкою кінетичних кривих. Другий механізм зумовлений розчиненням глибинного шару частинок ХДМ та характеризується другою ділянкою на кінетичних кривих, меншим кутом нахилу і меншою швидкістю порівняно з першою ділянкою кінетичних кривих. Це пов'язано з тим, що в процесі розчинення нерівності поверхні частинки ХДМ згладжуються; НЧ набуває форму, близьку до сферичної; площа взаємодії з кислим середовищем зменшується.

Отже, процес розчинення частинок ХДМ описується кінетичним рівнянням реакції I-го порядку та має дві стадії з різними швидкостями і механізмами. Визначено константи швидкості кожної стадії: для розчину з рН = 1,5: $k_1 = 4,37$; $k_2 = 0,09$; для розчину з рН = 5,0: $k_1 = 3,80$; $k_2 = 0,07$.

Тобто зменшення кислотності середовища призводить до уповільнення (у середньому в 1,22 раза) і погіршення процесу розчинення наночастинок ХДМ. Встановлений механізм процесу розчинення ХДМ є підтвердженням

наявності у наночастинок ХДМ хімічного потенціалу на приповерхневому шарі, де зосереджені катіони феруму, які є структуроутворювальними іонами, крім того незначна частина кожної НЧ, що переходить лише у розчин НСІ з рН=1,5 (~0,3 % приповерхневого шару) [334], вказує на хімічну стійкість ХДМ відносно рідких середовищ.

3.6. Умови зберігання, показники якості та безпечності ХДМ

З метою визначення умов зберігання ХДМ вивчено кінетику сорбції до рівноважного вологовмісту. Дослідження проводили тензометричним методом за температури $t=(25\pm 5)^\circ\text{C}$ та вологості повітря $\varphi=20\dots 90\%$, протягом 30 діб зберігання (рис.3.25).

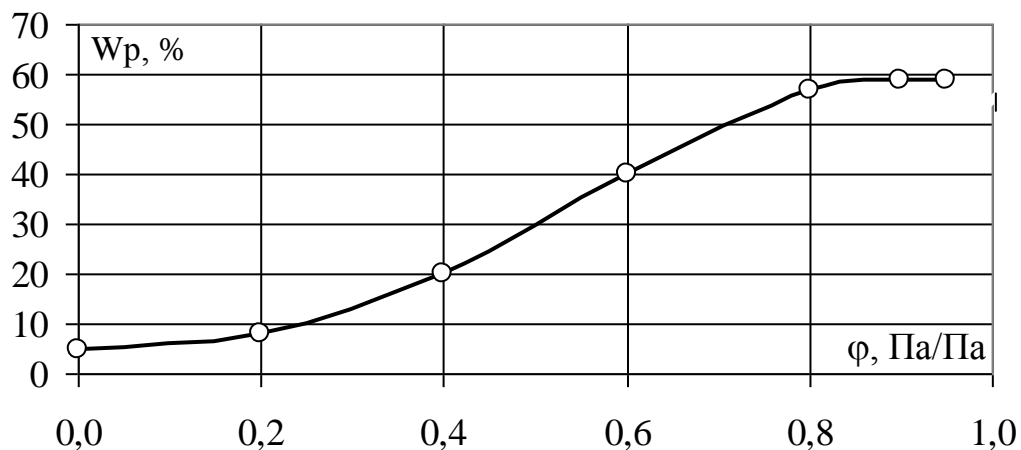


Рис. 3.25. Кінетика сорбції ХДМ до рівноважного вологовмісту

У результаті досліджень отримали залежність $Wp=f(\varphi)$ [145] (Wp – рівноважний вологовміст ХДМ, %; φ – вологість повітря, Па/Па). Отримано регресійне рівняння моделі рівноважного відносного вологовмісту (Wp) ХДМ (3.8):

$$Wp(\varphi, T) = a_1 + a_2\varphi + a_3T + a_4\varphi^1T + a_5\varphi^2 + a_6T^2 + a_7\varphi^2T + a_8\varphi \times T^2 + a_9\varphi^3 + a_{10}T^3, \quad (3.8)$$

де φ – значення показника відносної вологості; T – інтервал досліджень; a_i – коефіцієнти опроксимуючих значень моделі полінома (табл.3.9).

Таблиця 3.9

Коефіцієнти моделі полінома харчової добавки «Магнетофуд»

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}
25,689	-102,36	-0,071	178,463	$2,431 \times 10^{-3}$	0,601	0,378	-0,018	-61,977	$4,652 \times 10^{-5}$

Як видно з рис. 3.25 при $\varphi \geq 0,4$ ізотерма сорбції ХДМ починає різко зростати (тобто має більший нахил). Це зумовлено амфіфільністю та поверхневою активністю наночастинок ХДМ, що сприяє її гідратації. В області відносної вологості, що зазвичай рекомендується для зберігання сухих сипучих матеріалів 0,65...0,8, порошки містять досить велику кількість води. Проте її активність досить низька, що спричиняє консервувальний ефект. Слід відзначити, що при сушінні ХДМ досягається величина кінцевого вологовмісту близько 8...10% для можливості подальшого подрібнення. Це область мономолекулярного зв'язку води з матеріалом, де активність води $a_w < 0,2$. З рис. 3.25 також видно, що вже при $a_w = 0,4...0,6$ рівноважний вологовміст у ХДМ збільшується у 2...4 рази. За своїм характером отримані ізотерми сорбції можна віднести до колоїдних систем (здатність до високого ступеня гідратації-набрякання). Незважаючи на те, що порошки мають високу величину відносного вологовмісту W_p та низький показник a_w , утворення грудочок спостерігається вже при $\varphi \geq 0,75$, а при $\varphi \geq 0,85$ рівноважний вологовміст досягає рівня, якого можливий розвиток плісняви. Оскільки ХДМ притаманні бактеріостатичні та антиоксидантні властивості [436, 440, 466, 495, 498, 513], обмежень в області малих $\varphi < 0,65$ та більших $\varphi \geq 0,8$ по щодо зберігання не має. Вимоги до умов зберігання ХДМ такі: відносна вологість повітря $\varphi \leq (85 \pm 2)\%$; $t = -5...30^\circ\text{C}$.

Якість та безпечність ХДМ вивчено за наступними показниками: органолептичними, фізико-хімічними, мікробіологічними та токсикологічними (табл. 3.10), звідки видно, що ХДМ це однорідний тонкодисперсний порошок від темно-коричневого до чорного кольору, з розміром частинок 70...80 нм, без смаку та запаху. ХДМ – подвійний оксид дво- та тривалентного ферума ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), має структуру шпінелі. У вузлах решітки знаходяться катіони Fe^{2+} і Fe^{3+} , які мають вільні 3d-орбіталі і є структуроутворювальними.

Величина ξ -потенціалу 34...44 мВ сприяє утворенню стійких колоїдних систем. ХДМ є напівпровідником і їй притаманні магнітні властивості.

Показники якості та безпечності харчової добавки «Магнетофуд»

Назва показника	Характеристики	
<i>Фізико-хімічні показники</i>		
Формула, молярна маса, співвідношення FeO та Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄ або FeO·Fe ₂ O ₃ M = 230,8 г/моль FeO — 30,9%; Fe ₂ O ₃ — 69,1%	
Розмір частинок	Однорідна система частинок з невисоким ступенем полідисперсності, розмір частинок 70...80 нм	
Масова частка вологі, %, не більше	10,0	
Масова частка сполучень заліза в перерахунку на Fe ₃ O ₄ , %, не менше	90,0	
pH водної суспензії, од.	7,0...8,0	
Намагніченість насичування	338 кА/м (при 300 К)	
Величина ξ -потенціалу	34...44 мВ	
<i>Органолептичні показники</i>		
Колір	Від темно-коричневого до чорного	
Запах	Без сторонніх запахів	
Смак	Без сторонніх присмаків	
Зовнішній вигляд, консистенція	Однорідний, сухий, тонкодисперсний, сипучий порошок без сторонніх домішок. Допускається наявність грудочок до 10%, що легко розсипаються при натисканні	
<i>Мікробіологічні показники</i>		
Назва показника	Норматив	Фактичний вміст
КМАФАнМ, КУО/г	Не більше 1×10^4	15
V. cereus КУО/г	Не більше 2×10^2	Не виявлено
БГКП (коліформи)	Не доп. в 0,1 г	Не виявлено
E. coli	Не доп. в 1,0 г	Не виявлено
S. aureus	Не доп. в 1,0 г	Не виявлено
Патогенні мікроорганізми, в т.ч. бактерії роду Сальмонела	Не допускаються в 10 г	Не виявлено
Дріжджі, КУО/г	Не більше 1×10^2	Не виявлено
Плісняві гриби, КУО/г	Не більше 1×10^2	Не виявлено
<i>Токсикологічні показники</i>		
Назва токсичного елементу	Норматив (мг/кг)	Фактичний вміст (мг/кг)
Свинець	Не більше 0,6	0,01
Кадмій	Не більше 0,1	0,02
Ртуть	Не більше 0,01	—
Арсен (миш'як)	Не більше 1,0	—

Мікробіологічні показники і вміст токсичних металів в ХДМ не перевищує нормативів для харчових та біологічно активних добавок мінерального походження, що діють на території України [454, 499]. Таким чином, харчова добавка «Магнетофуд» (ХДМ) повністю задовольняє вимоги, встановленим для харчових добавок мінерального походження.

Висновки за розділом 3

1. Визначено, що технологія хімічної конденсації з ефектом солюбілізації є ефективною та дозволяє регулювати фізико-хімічні показники наночастинок на основі оксидів заліза. Встановлено раціональні параметри технологічного процесу утворення наночастинок з цільовою задачею щодо розміру 70...80 нм. Такими умовами та параметрами є: використання 10% розчинів солей дво- та тривалентного феруму у лужному середовищі (рН=10...11) при температурі $T=(50\pm 5)^{\circ}\text{C}$ і 1,7...1,8 кратному надлишку солі Fe (II) та 10,0...10,5 кратному надлишку луку $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ порівняно із стехіометричними значеннями. Розроблено та проаналізовано модель “тісного контакту” під час підготовки сировини (солей ферума), яка враховує механізм утворення сольових розчинів та взаємодії вихідних компонентів $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ і $\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Відпрацьована технологія дозволяє отримати наночастинок з розподілом за розміром близьким до монодисперсності.

2. Вивчені основні фізико-хімічні показники ХДМ (на основі подвійного оксиду дво-та тривалентного заліза), такі як хімічна активність, що до вступу в хімічні реакції з компонентами харчової сировини (білками, жирами, вуглеводами, водою) за різних рН та температур; молярна маса 230,8 г/моль; вміст заліза в масових відсотках не менше 90 та вологи 10%; магнітні (намагніченість насичування 338 кА/м при 300 К) властивості; ξ -потенціал (від 34 до 44 мВ); обмежена розчинність в рідких середовищах з рН від 1,5 до 9,0 (масова частка ХДМ, що перейшла у розчини, становить: HCl з рН=1,5 – $\omega_{\text{Fe}_3\text{O}_4}=9,3\%$, з рН=5,0 – $\omega_{\text{Fe}_3\text{O}_4}=0,3\%$; NaOH з рН=9,0 – $\omega_{\text{Fe}_3\text{O}_4}=0,01\%$).

Особливу увагу приділено вивченню дисперсності нанопорошку (встановлений діаметр частинок: $d=(75\pm 5)$ нм). Визначена функція розподілу частинок за діаметром, яка доводить, що отримана дисперсна система частинок характеризується досить однорідним розподілом близьким до монодисперсності та стійкості до зовнішніх чинників зберігання та окиснення.

3. Доведено, що поверхнева активність наночастинок ХДМ, виходячи з досить значної величини ξ -потенціалу (34...44) мВ, чинить на колоїдні системи ознаки стійкості, стабільності як за кінетичною, так і за седиментаційною характеристиками, причому стійкість колоїдних систем підвищується в кислих середовищах, у розчинах полісахаридів, білків, олій, жирів, вищих жирних кислот та їх солей в середньому на (55 ± 5) %, що пояснено взаємодією наночастинок з переліченими компонентами та їх просторовим структуруванням.

4. Встановлено, що ХДМ має хімічну поверхневу активність, яка проявляється в електростатичних і координаційних взаємодіях з різними речовинами: білками, полісахаридами. Тому введення ХДМ у харчові колоїдні системи уповільнює процеси руйнування електростатичних взаємодій, сприяючи формуванню нових зв'язків та стабілізуючи колоїдну структуру.

5. Експериментально показано, що ХДМ притаманні амфіфільні (дифільні) властивості, а значить, і здатність до утворення різних надмолекулярних структур: моношарів, міцел, ліпосом, іншими словами, здатність до структуроутворення.

6. Визначено умови зберігання, показники якості і безпечності ХДМ. Встановлено, що технологією виробництва ХДМ досягнуті ФТВ, які сприяють її використанню як покращувача харчових систем.

РОЗДІЛ 4

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ХАРЧОВОЇ ДОБАВКИ «МАГНЕТОФУД» (ПОДВІЙНОГО ОКСИДУ ДВО- ТА ТРИВАЛЕНТНОГО ЗАЛІЗА)

У цьому розділі узагальнено результати експериментальних досліджень, спрямованих на встановлення закономірностей взаємодії харчової добавки «Магнетофуд» (ХДМ) з білками, жирами, полісахаридами, водою; обґрунтування фізико-хімічних моделей жирозв'язування наночастинками «Магнетофуд» (НЧМ) та водоутримувальної здатності ХДМ у харчових системах, які містять одночасно білки та вуглеводи, а також для розчинів полісахаридів; обґрунтування антиоксидантних й емульгуювальних властивостей ХДМ і її впливу на загушувальні, піно- і гелеутворювальні властивості харчових систем.

4.1. Наукове обґрунтування взаємодії ХДМ з основними компонентами харчових систем – білками, жирами, полісахаридами, водою

ХДМ може бути поліпшувачем харчових систем, тому що забезпечує їх колір, стійкість до окислювального псування, бере участь у формуванні їх структури. Відповідно до *загальної концепції роботи*, яка передбачає використання функціонально-технологічного потенціалу НЧ мінерального походження (оксидів заліза) в харчовій продукції з поліфазною структурою з метою покращення якості та подовження термінів зберігання готових виробів, виникла необхідність у дослідженнях, що пов'язані з визначенням характеру взаємодії ХДМ з білками, жирами, полісахаридами, водою – основними складовими технологічного середовища. Знання механізмів: взаємодії з цими речовинами; зв'язування й утримання води та жиру сировинними компонентами дозволить раціонально використовувати нові види харчової сировини й прогнозувати поведінку сировинних інгредієнтів в харчовій продукції з гетерогенною дисперсною структурою.

Хімічна активність НЧМ визначається переважно електростатичними – диполь-дипольними (вандерваальсовими) і іонно-дипольними взаємодіями. В адсорбції білків, жирів, вуглеводів та води на поверхні НЧМ беруть участь також донорно-акцепторні (координаційні) взаємодії, наприклад, водневі зв'язки [475, 500, 501]. На рис 4.1 наведено схеми механізму сольватації НЧМ, що пояснює встановлені закономірності формування властивостей харчових систем.

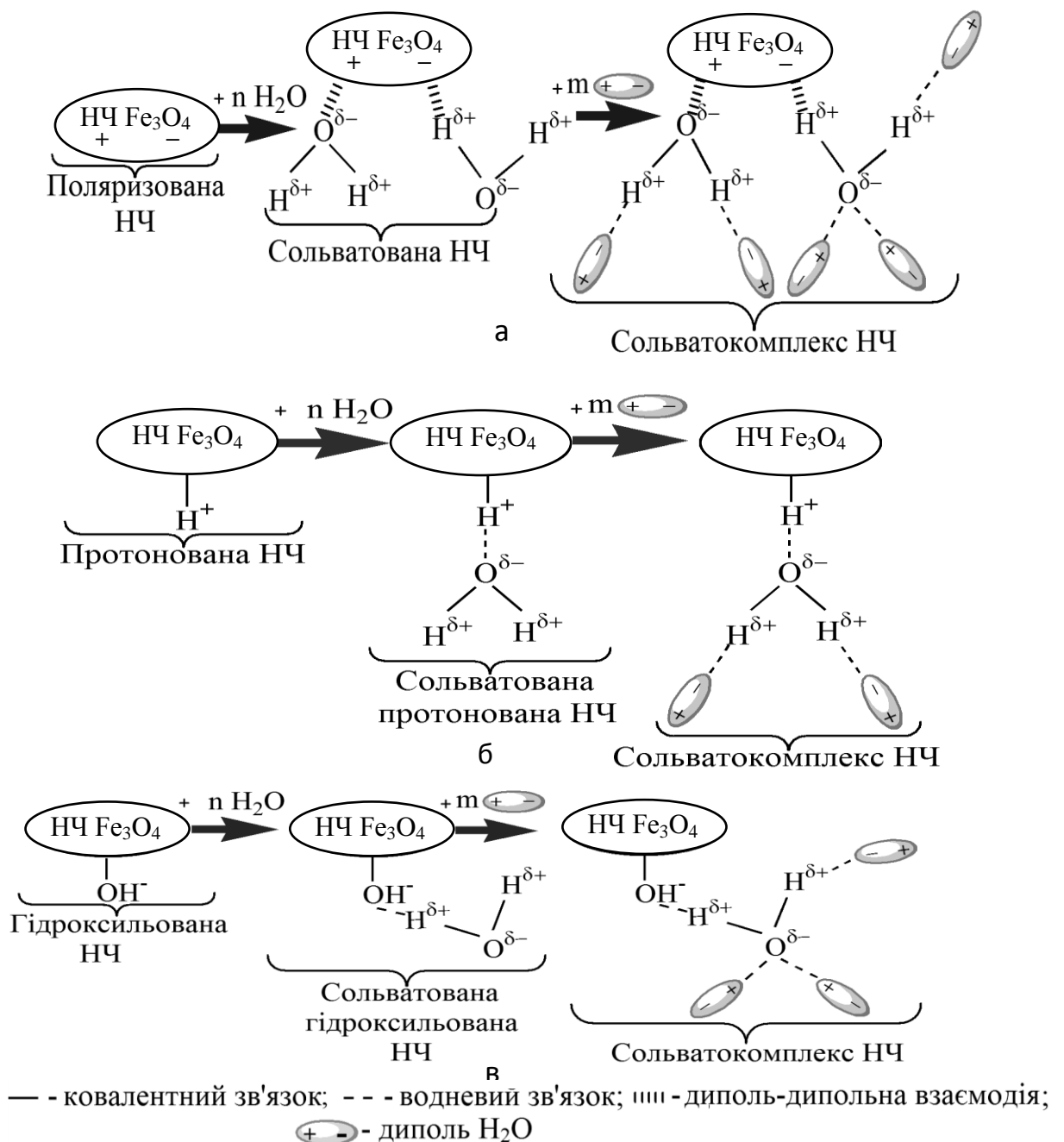


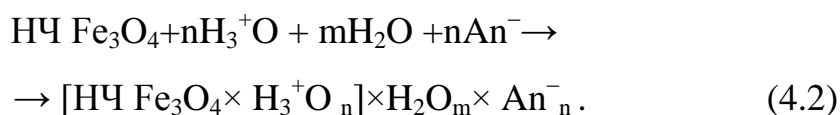
Рис. 4.1. Механізми сольватації наночастинок ХДМ при різних значеннях рН у водних середовищах: а – нейтральне середовище (рН~7,0); б – кисле середовище (рН<7,0); в – лужне середовище (рН>7,0)

На поверхні НЧМ знаходяться різнойменно поляризовані ділянки ($^{+\delta}\text{Fe}$) і ($^{-\delta}\text{O}$). Катіони Fe^{2+} і Fe^{3+} НЧМ є структуроутворювальними. Висока напруженість електричного поля, створеного катіонами феруму магнітних НЧ, підсилює поляризацію молекул речовин, які знаходяться поруч, а це сприяє додатковій впорядкованості диполів, наприклад, пептидного зв'язку, NO^- -групи, COO^- -групи, H_2O та інших, за межами поверхні частинок і хемосорбції. У нейтральному середовищі ($\text{pH}=6,8-7,0$) утворюються поляризовані НЧМ (рис. 4.1, а), які далі переходять у сольватовані частинки та сольватовані аквакомплекси хімічного складу (4.1):



В ізоелектричній точці та в нейтральному середовищі ($\text{pH}=6,8-7,0$), коли щільність поверхневого заряду НЧМ мінімальна, контакт диполів-НЧ з диполями H_2O відбувається за рахунок міжмолекулярної диполь-дипольної взаємодії. Енергія диполь-дипольної (вандерваальсової) взаємодії невелика, близько 5...50 кДж/моль. У результаті утворюються сольватовані НЧМ, поверхня яких набуває гідрофільність і здатність взаємодіяти з іоногенними групами білків, жирів, вуглеводів, диполями води, в основному за рахунок утворення міжмолекулярних водневих зв'язків. Енергія водневого зв'язку становить 5...100 кДж/моль. За рахунок водневих зв'язків між молекулами води виникає аквакомплекс або сольватоккомплекс.

У кислому середовищі ($\text{pH}<6,8$) (рис. 4.1, б) виникають протоновані, потім сольватовані-протоновані НЧМ, які далі утворюють сольватовані аквакомплекси хімічного складу (4.2):



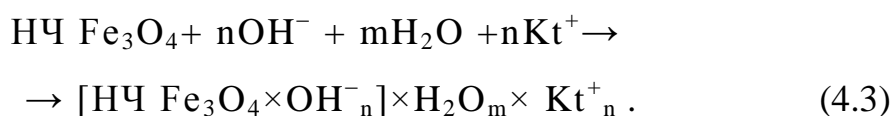
При цьому НЧМ протонуються, утворюючи протоновані НЧМ за типом координаційного зв'язку (донором виступає Оксиген ХДМ, акцептором – протон- H^+ середовища).

Енергія координаційного зв'язку становить 50...200 кДж/моль. Далі протоновані НЧМ можуть утворювати зв'язки за іонним (енергія $\sim 100...400$

кДж/моль) й іонно-дипольним (енергія $\sim 50 \dots 200$ кДж/моль) типом з іонами та полярними групами молекул білків, жирів, полісахаридів та водою. Сольватовані-протоновані НЧМ, реагуючи з диполями H_2O за іонно-дипольним типом (рис. 4.1, б), утворюють сольватоконплекси, у яких НЧМ виступає в ролі конплексоутворювача, а диполі води – лігандами.

Можна уявити механізм протонування НЧМ в кислому середовищі не тільки протонами H^+ , але й іонами гідроксонію, так як H^+ взаємодіють з молекулами води, утворюючи іони гідроксонію (H_3^+O), які взаємодіють з диполями НЧМ за іонно-дипольним механізмом, утворюючи гідроксовані НЧМ (рис. 4.1, б). Ці гідроксовані НЧМ утворюють систему водневих зв'язків з молекулами H_2O і гідрофільними групами молекул білків, жирів, полісахаридів за іонно-дипольним та іонним типами взаємодії.

У лужному середовищі ($\text{pH} > 7,0$) (рис. 4.1, в) спочатку утворюються гідроксильовані НЧМ, потім виникають сольватовані-гідроксильовані НЧМ, які далі утворюють сольватовані акваконплекси хімічного складу (4.3):



Гідроксильні групи (OH^-) за іонно-дипольним та координаційним механізмами (донором виступає Оксиген OH^- групи, акцептором – вакантні 3d-орбіталі Fe) взаємодіють з поляризованими НЧМ (рис. 4.1, в). Утворені гідроксильовані НЧМ набувають негативного заряду та вступають у взаємодію за іонним та іонно-дипольним механізмами з іонами і диполями молекул білків, полісахаридів, жирів, включно H_2O , утворюючи водневі зв'язки. У результаті взаємодії гідроксильованих НЧМ з диполями води утворюються сольватоконплекси (акваконплекси). Слід зазначити, що найбільш інтенсивно в хімічні взаємодії НЧМ вступають в кислому середовищі з утворенням більш міцних зв'язків [475]. Для детальнішого пояснення механізму взаємодії білків, вуглеводів (полісахаридів), жирів з НЧМ розглянемо хімічні та електростатичні взаємодії, які виникають між НЧМ та іоногенними групами цих сполук.

На рис. 4.2 наведено механізми іонних взаємодій (енергія зв'язку ~ 500...1000 кДж/моль) НЧМ з іоногенними групами жирів, білків, полісахаридів – на прикладі поліпептиду [475, 500, 501].

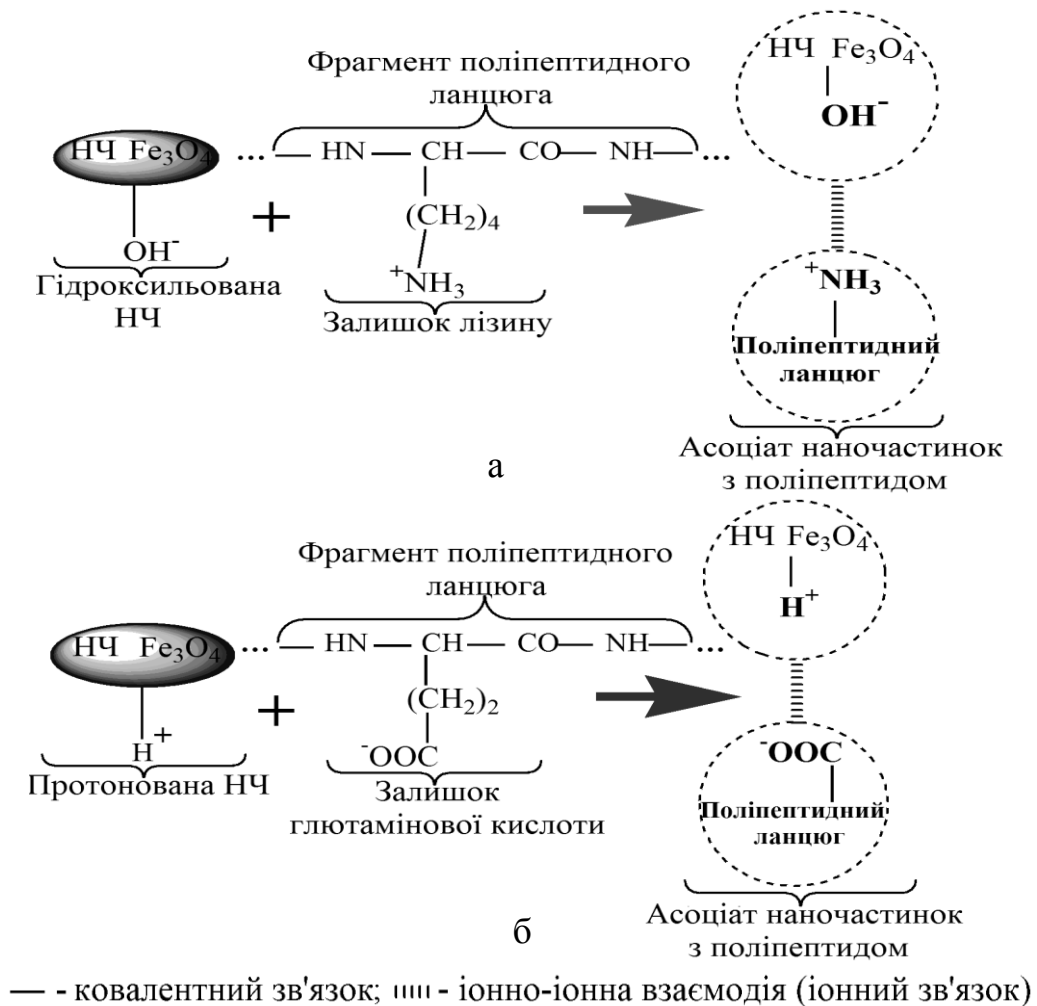


Рис. 4.2. Іонні взаємодії між НЧМ та іоногенними групами поліпептиду: а – гідроксильована НЧМ та залишок лізину; б – протонована НЧМ та залишок глютамінової кислоти

Як видно з рис. 4.2, іонні взаємодії виникають між: *негативно* зарядженими OH⁻-групами гідроксильованих НЧМ і *позитивно* зарядженими NH₃⁺-групами бічних радикалів лізину (рис. 4.2, а); *позитивно* зарядженими катіонами H⁺ протонованих НЧМ і *негативно* зарядженими COO⁻-групами бічних радикалів глютамінової кислоти (рис. 4.2, б). На рис. 4.3 наведені механізми іонно-дипольної та диполь-дипольної взаємодій НЧМ з іоногенними групами жирів, білків, полісахаридів – на прикладі поліпептиду.

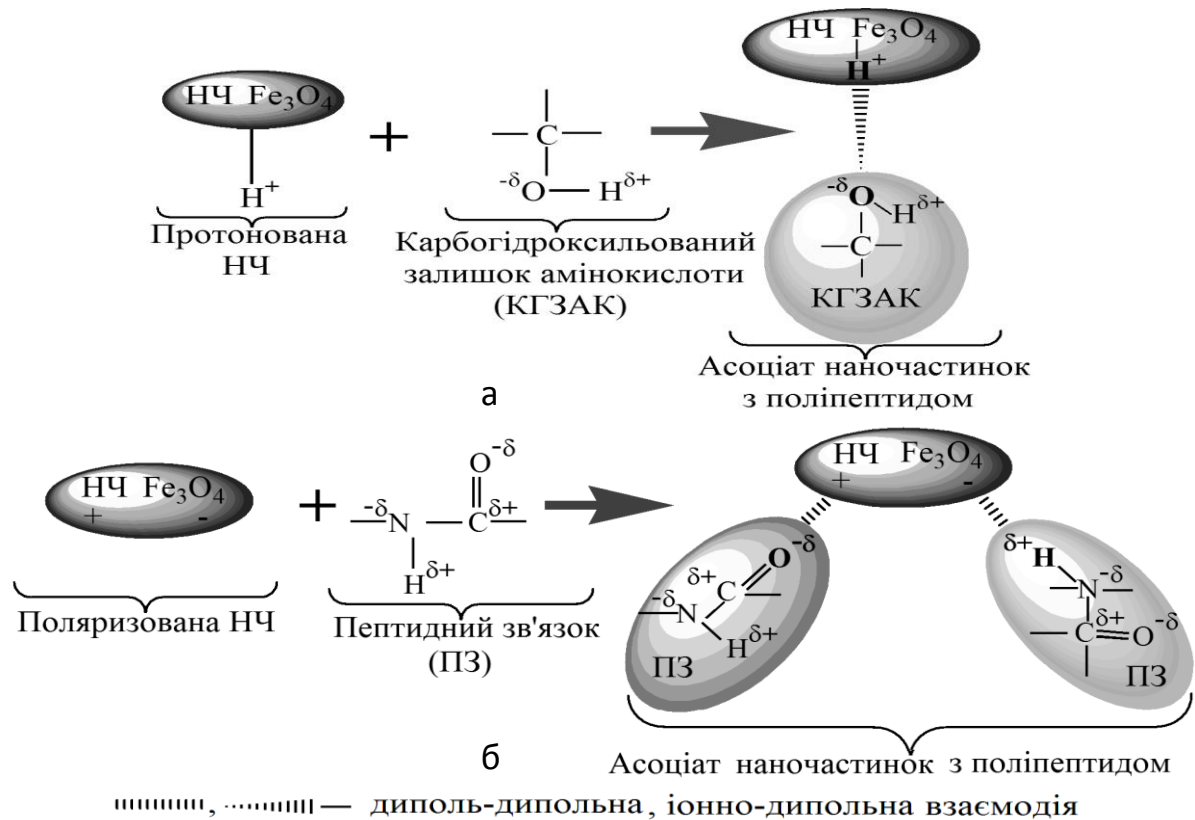


Рис. 4.3. Механізми взаємодій між НЧМ та іоногенними групами поліпептиду: а – іонно-дипольна взаємодія; б – диполь-дипольна взаємодія

Як видно з рис. 4.3, іонно-дипольні взаємодії виникають між протонованими НЧМ та карбогідроксильованими залишками білків, ліпідів, вуглеводів. Диполь-дипольні взаємодії – між полярними (поляризованими) НЧМ та диполем пептидного зв'язку. В основному НЧМ взаємодіють з білками, жирами, вуглеводами за рахунок електростатичних координаційних взаємодій, результатом яких є утворення електростатичних комплексів: «клатратів» («молекули-господарі» координують субстрат у внутрішньо-молекулярних порожнинах) (рис. 4.4) і «кавітатів» («молекули-господарі» координують субстрат в міжмолекулярних порожнинах) (рис. 4.5). Велику роль при виникненні комплексів «білок (полісахарид, жир)+НЧ» відіграє координаційний (донорно-акцепторний) зв'язок. Наприклад, у разі гістидину і триптофану донором є атом Нітрогену гетероциклічних систем, що має вільну електронну пару на зовнішній оболонці. Як акцептор-комплексоутворювач виступають катіони ферума НЧМ (Fe^{2+} , Fe^{3+}), які мають вакантні 3d-орбіталі. На рис. 4.4

наведено внутрішньо-молекулярний комплекс – «клатрат» типу комплекс-клітина, що утворюється за рахунок трьох внутрішньомолекулярних координаційних зв'язків між НЧМ і атомами Нітрогену гетероциклічних систем гістидину і триптофану, які належать до однієї полімерної молекули (ланцюга), що зумовлює значну міцність комплексу.

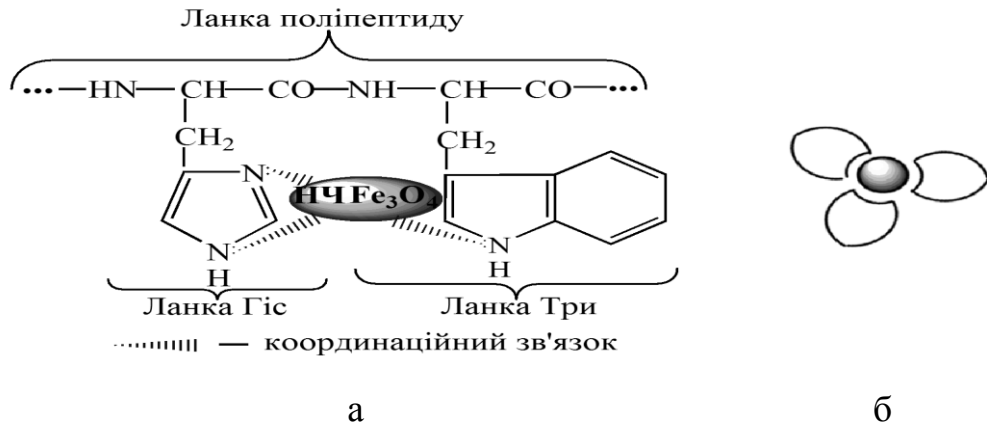


Рис. 4.4. Внутрішньомолекулярний комплекс – «клатрат» типу «комплекс-клітина», утворений НЧМ і ланкою поліпептидного ланцюга гліадину: а – «клатрат» НЧ+білок; б – «комплекс-клітина НЧ+білок

Приклади складних асоціатів полігетероциклічних лігандів молекул білків з НЧМ, що поєднують, наприклад, фрагменти гістидину і триптофану двох поліпептидних ланцюгів з катіонами феруму (Fe^{2+} , Fe^{3+}), наведені на рис. 4.5.

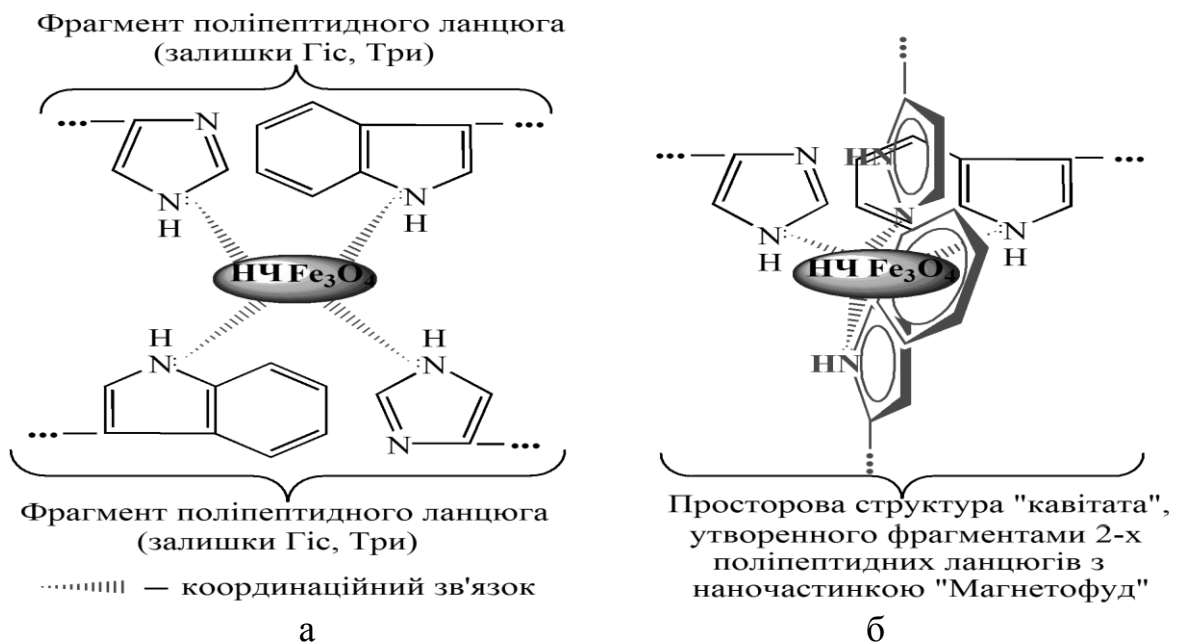


Рис. 4.5. Міжмолекулярний комплекс НЧМ з ланками двох поліпептидних ланцюгів: а – «кавітат» НЧ+білок; б – просторова структура «кавітата» НЧ+білок

Звідки випливає, що катіони Fe^{2+} і Fe^{3+} НЧМ вступають у міжмолекулярне комплексоутворення з атомами Нітрогену двох поліпептидних ланцюгів. Результат цієї взаємодії – міжмолекулярний комплекс «кавітат» НЧ+білок. Крім того, що катіони феруму (Fe^{2+} , Fe^{3+}) НЧМ координуються в лінійному ліганді (рис. 4.5, а), вони також міцно утримують перпендикулярно розташований аналогічний ліганд (рис. 4.5, б). Таке складне спорудження виявляється міцним за рахунок множинності утворених координаційних зв'язків.

Різновидом координаційних зв'язків вважають водневий зв'язок. На рис. 4.6 наведено можливі гідрофільні контакти сольватованих НЧМ з іоногенними групами білків, полісахаридів (вуглеводів). З рис. 4.6 видно, що в харчових системах виникають сольватовані НЧМ, які вступають у гідрофільні контакти, представлені водневими зв'язками за донорно-акцепторним механізмом. Водневі зв'язки НЧМ утворюють з диполями води, молекулами білків і полісахаридів (вуглеводів), що містять гідрофільні групи C–O, C–N, O–H, S–H (рис.4.6). Унаслідок підвищується стабільність систем: «білок+сольватована НЧМ», «вуглевод+сольватована НЧМ» та уповільнюється утворення гідрофобних зв'язків між фрагментами макромолекул, що перешкоджає їх агрегації.

Під впливом НЧМ високомолекулярні сполуки (білки, полісахариди, вищі жирні кислоти, жири) зазнають структурних змін, утворюючи з НЧМ достатньо стійкі структури. На рис. 4.7 наведено процес самоорганізації НЧМ в електростатичні комплекси з білками, полісахаридами та жирами. На прикладі білка гліадину (рис. 4.7, а) показано комплекс НЧМ з гліадином, стабілізований координаційними (донорно-акцепторними) зв'язками атомів Fe з атомами Оксигену і Нітрогену залишків глютаміну та триптофану, а також електростатичними гідрофобними взаємодіями аліфатичних бічних ланцюгів залишків лейцину та π - π -стекинг взаємодією ароматичних фрагментів залишків триптофану. Все це зумовлює більш розгалужену будову і переплетення білкових макромолекул.

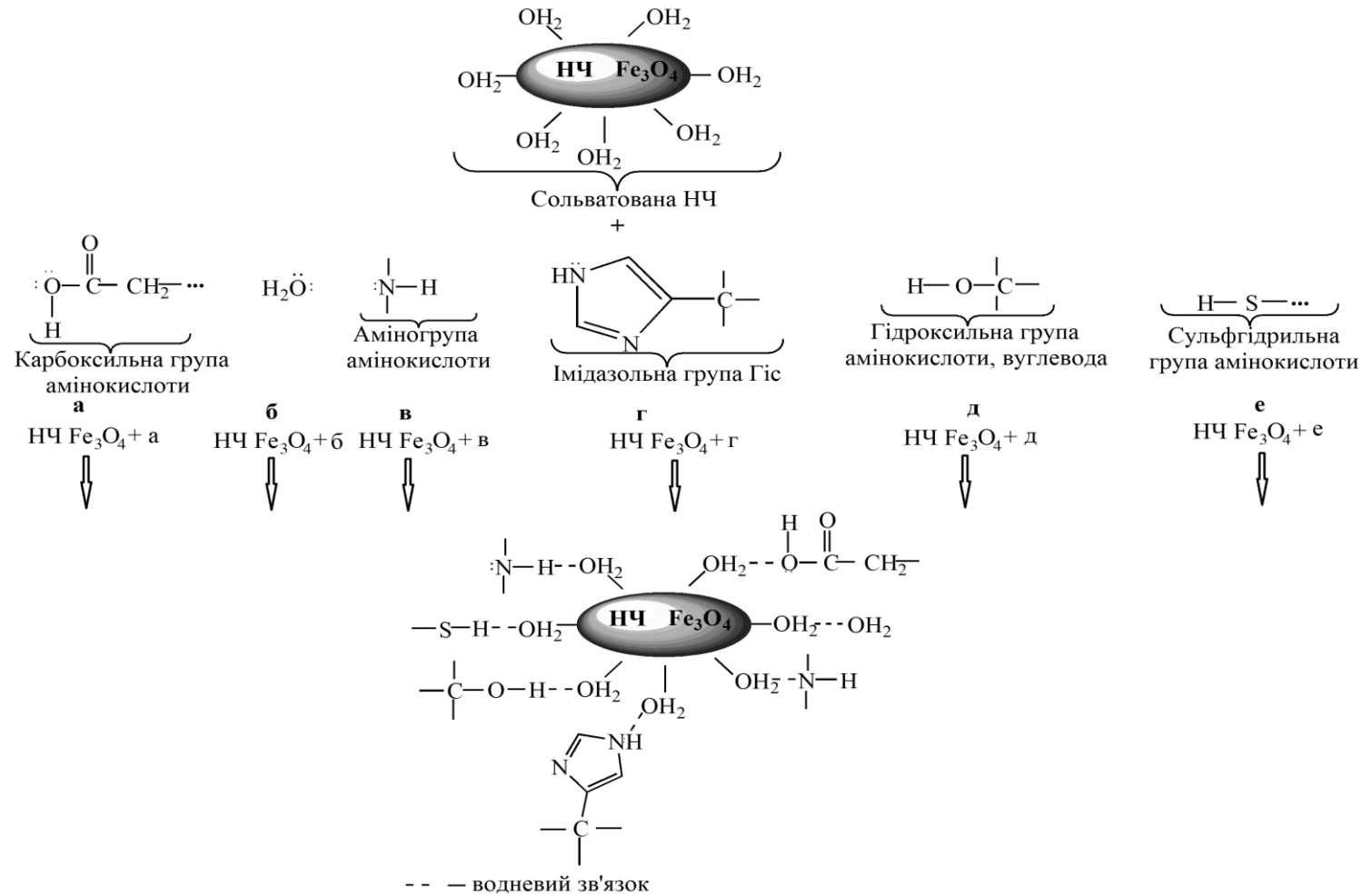


Рис. 4.6. Водневі зв'язки між сольватованими НЧМ та іоногенними групами білків, вуглеводів (полісахаридів): *a* – карбоксильна група ; *б* – вода; *в* – аміногрупа амінокислоти; *г* – імідазольна група гістидину; *д* – гідроксильна група амінокислоти або вуглевода; *е* – сульфгідрильна група амінокислоти

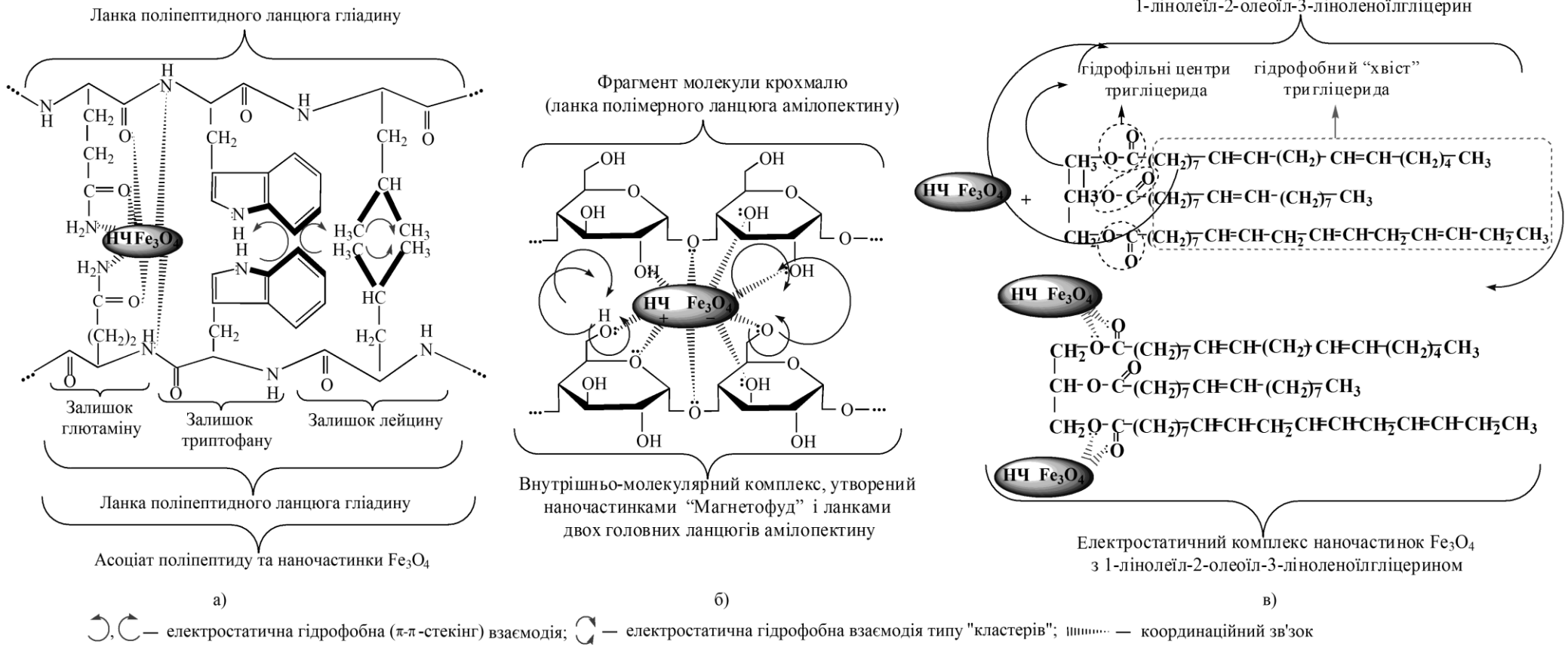


Рис. 4.7. Електростатичні комплекси НЧМ (Fe_3O_4): а – з білком – гліадином; б – з полісахаридом – амілопектином; в) – з жиром – тригліцеридом

У результаті виникають утворення типу «кластерів», «клатратів», «кавітатів» та «петель». Міжмолекулярні комплекси НЧМ з ланками двох головних ланцюгів амілопектину (рис. 4.7, б) формуються за рахунок координаційних зв'язків атомів Fe з Оксигенами (ефірними, піранозними і гідроксильними) залишків D-глюкопіранози, що підсилюються π - π стекінг взаємодію піранозних циклів за типом «площина-до-площини». У молекулі амілопектину π - π стекінг взаємодія зумовлена електростатичними силами: гідروفобними і дисперсійними лондоновськими між залишками глюкопіраноз. Все це сприяє, по-перше, збільшенню ступеня розгалуження головного ланцюга полісахариду, зокрема амілопектину, по-друге, виникненню утворень типу «кластерів». Під впливом НЧМ жири зазнають структурні зміни, утворюючи з НЧМ супрамолекулярні асоціати (рис. 4.8, в) – електростатичні комплекси за рахунок координаційних зв'язків атомів Fe з атомами Оксигену естерної групи тригліцеридів, що обумовлює їх хемосорбцію на реакційно активній поверхні полярних НЧМ.

4.2. Експериментальне підтвердження взаємодії ХДМ з білками, жирами, полісахаридами, водою

ІЧ-Фур'є спектроскопія. Для встановлення механізму хімічної взаємодії молекул білків, жирів, полісахаридів з ХДМ були проведені Фур'є-ІЧ-спектроскопічні дослідження модельних систем яєчного білка, крохмалю, лінолевої кислоти та соняшникової олії з ХДМ у діапазоні (400–4000) см^{-1} (табл.4.1, табл. 4.2, рис. 4.8, додаток А.2). Як видно з даних табл. 4.1, інтенсивна широка смуга з максимумом поглинання $(3341 \pm 4) \text{ см}^{-1}$, зміщена в комплексному асоціаті в низькочастотну область см^{-1} , в порівняння з частотою вільних ОН-груп і аміду А (N–H) $(3406 \pm 4) \text{ см}^{-1}$, свідчить про участь гідроксильних Оксигенів й амідних Нітрогенів в утворенні координаційних зв'язків з атомами Fe ХДМ.

Таблиця 4.1

Порівняння хвильових чисел окремих піків в ІЧ-спектрах комплексного асоціата «яєчний білок+Магнетофуд» і вихідних речовин (яєчний білок, харчова добавка «Магнетофуд» – ХДМ)

Коливання зв'язку	Положення максимумів (хвильові числа), см^{-1}			Зсув, см^{-1}
	Яєчний білок	ХДМ	«яєчний білок+Магнетофуд»	
$\nu(\text{O-H}), \nu(\text{N-H})$ – Амід А	3406±5	–	3341±5	-65
$\nu_{\text{ас}}(\text{C-H})$	2927±4	–	2927±4	0
$\nu_{\text{с}}(\text{C-H})$	–	–	2360±4; 2342±3	–
$\nu(\text{C=O})$ – Амід І	1653±3	–	1642±3	-11
$\delta_{\text{пл.}}(\text{N-H})$ –Амід ІІ	1539±3	–	1527±3	-12
$\delta_{\text{пл.}}(\text{C-H})$	1451±3	–	1442±3	-9
$\delta_{\text{пл.}}(\text{C-C})$	1239±2	–	1239±2	–
$\delta_{\text{пл.}}(\text{C-C})$	–	–	1155±2	–
$\delta_{\text{впл.}}(\text{C-C})$	1079±2	–	1027±2	-52
$\nu(\text{Fe-O})$	–	532±2	588±2	+56

У спектрі комплексу «яєчний білок+Магнетофуд» спостерігаються інтенсивні смуги з максимумами при $(2360\pm4) \text{ см}^{-1}$ і $(2342\pm3) \text{ см}^{-1}$, які відсутні у спектрі яєчного білка (табл. 4.1). Ці піки можна віднести до симетричних валентних ($\nu_{\text{с}}$) коливань С–Н зв'язку, що підтверджують електростатичні гідروفобні взаємодії аліфатичних бічних ланцюгів амінокислотних залишків у «клатратах» та «кавітатах», що виникають під дією НЧМ.

При адсорбції яєчного білка на поверхні НЧМ спостерігається зміщення смуг поглинання валентних коливань амиду І $\nu(\text{C=O})$ та площинних деформаційних коливань амиду ІІ $\delta_{\text{пл.}}(\text{N-H})$ на нижчу частоту в область: $\nu(\text{C=O})=(1642\pm3) \text{ см}^{-1}$; $\delta_{\text{пл.}}(\text{N-H})=(1527\pm3) \text{ см}^{-1}$ відповідно.

У спектрі комплексу «яєчний білок+Магнетофуд» смуги поглинання площинних та позаплощинних деформаційних коливань $\delta_{\text{пл.}}(\text{C-H})$ і $\delta_{\text{впл.}}(\text{C-C})$ зміщуються на нижчу частоту – в область: $\delta_{\text{пл.}}(\text{C-H}) = (1442\pm3) \text{ см}^{-1}$ і $\delta_{\text{впл.}}(\text{C-C}) = (1027\pm2) \text{ см}^{-1}$ відповідно, також спостерігається нова смуга поглинання площинних деформаційних коливань $\delta_{\text{пл.}}(\text{C-C}) (1155\pm2) \text{ см}^{-1}$. Це підтверджує

електростатичні гідрофобні взаємодії аліфатичних та циклічних амінокислотних залишків у комплексному асоціаті.

У спектрі чистої ХДМ (табл. 4.1) присутня лінія поглинання зв'язку Fe–O з максимумом при значенні $\sim 532 \text{ см}^{-1}$, що добре узгоджується з даними літературних джерел $\sim 530 \text{ см}^{-1}$ [4–8]. Зсування максимуму відповідної смуги поглинання валентних коливань зв'язку Fe–O в комплексі «яєчний білок +Магнетофуд» (табл. 4.1) в область $\sim 588 \text{ см}^{-1}$ пов'язане з впливом дії поверхневих молекул яєчного білку, з їх втручанням у приповерхневий шар наночастинок Fe_3O_4 та хімічною взаємодією з катіонами ферума. Таким чином, результати досліджень підтверджують утворення комплексу між яєчним білком і ХДМ.

Порівняння ІЧ-спектрів (табл. 4.2, додаток А.2) показує, що хвильові числа піків розрізняються в спектрах вихідних речовин (крохмаль, ХДМ) і комплексу «крохмаль+Магнетофуд», вказуючи на хімічну взаємодію в вуглеводно-магнетофудовій модельній системі.

Таблиця 4.2

Порівняння хвильових чисел окремих піків в ІЧ-спектрах комплексного асоціата «крохмаль+Магнетофуд» і вихідних речовин (картопляний крохмаль, ХДМ)

Коливання зв'язку	Положення максимумів (хвильові числа), см^{-1}			Зсув, см^{-1}
	Крохмаль	ХДМ	«крохмаль+Магнетофуд»	
$\nu(\text{O-H})$	3443 ± 5	–	3415 ± 5	-28
$\nu_{\text{as}}(\text{C-H})$	2927 ± 4	–	2917 ± 4	-10
$\nu_{\text{s}}(\text{C-H})$	–	–	2360 ± 4 ; 2342 ± 3	–
$\nu(\text{C-O-C})$	1653 ± 3	–	1640 ± 3	-13
$\delta_{\text{пл.}}(\text{C-O-C})$	1457 ± 3	–	1441 ± 3	-16
$\delta_{\text{пл.}}(\text{C-C})$	1162 ± 2	–	1152 ± 2	-10
$\delta_{\text{пл.}}(\text{C-C})$	–	–	1081 ± 2 ; 1021 ± 2	–
$\delta_{\text{впл.}}(\text{C-C})$	982 ± 2		922 ± 2	-60
$\delta_{\text{впл.}}(\text{C-C})$	857 ± 2		847 ± 2	-10
$\delta_{\text{впл.}}(\text{C-C})$	763 ± 2		753 ± 2	-10
$\nu(\text{Fe-O})$	–	532 ± 2	589 ± 2	+57

У спектрі комплексу «крохмаль+Магнетофуд» спостерігається зміщення інтенсивної смуги вільних OH-груп (3443 ± 5) см^{-1} в низькочастотну область –

(3415 ± 5) cm^{-1} , що свідчить про участь гідроксилів в темі водневих зв'язків та електростатичних координаційних взаємодій – з атомами Fe ХДМ.

Зміщення піку валентних ν (C–O–C) на (13 ± 3) cm^{-1} та площинних деформаційних коливань $\delta_{\text{пл.}}$ (C–O–C) на (16 ± 3) cm^{-1} в низькочастотну область порівняно з дослідним зразком крохмалю свідчить про наявність кулонівських та координаційних взаємодій між атомами Fe ХДМ та Оксигенами (ефірними, піранозними і гідроксильними) залишків D-глюкопіранози.

Поява нових смуг поглинання в області $(700\text{--}1200)$ cm^{-1} , що характеризують коливання карбонового скелету, і зрушення в область більш низьких частот деяких характеристичних смуг поглинання (C–C) зв'язків свідчить про наявність гідрофобних і дисперсійних лондоновських взаємодій між залишками глюкопіраноз.

Зсунення максимуму поглинання зв'язку Fe–O в високочастотну область на (57 ± 2) cm^{-1} порівняно з дослідним зразком чистої ХДМ свідчить про хімічну взаємодію катіонів ферума ХДМ з молекулами крохмалю. Усе це підтверджує наявність хімічної взаємодії у комплексному асоціаті «крохмаль+Магнетофуд».

Методом ІЧ-Фур'є спектроскопії (рис. 4.8) доведена хемосорбція лінолевої кислоти та 1-лінолеїл-2-олеїл-3-ліноленоїлгліцерина на поверхні наночастинок ХДМ. В ІЧ-спектрах комплексів: «лінолева кислота+Магнетофуд» (рис. 4.8; 4) та «соняшникова олія+Магнетофуд» (рис. 4.8; 5) з'являються дві нові смуги при 1543 cm^{-1} (рис. 4.8; 4) та 1540 cm^{-1} (рис. 4.8; 5) і 1638 cm^{-1} (рис. 4.8; 4) та 1636 cm^{-1} (рис. 4.8; 5), що характерні для валентних асиметричних (ν_{as}) і валентних симетричних (ν_{s}) коливань карбоксилатної групи (COO^-). А смуга поглинання при 1710 cm^{-1} (у зразку – лінолева кислота, рис. 4.8; 2) та при 1744 cm^{-1} (у зразку – соняшникова олія, рис. 4.8; 3), характерна для валентних коливань (C=O)-зв'язку, зникає.

Тобто жир (лінолева кислота або тригліцериди соняшникової олії) хемосорбовані на поверхні наночастинок ХДМ в карбоксилатної формі – за допомогою двох атомів Оксигену. Результатом є утворення на поверхні наночастинок ХДМ *мономолекулярного шару* хімічно адсорбованого жиру.

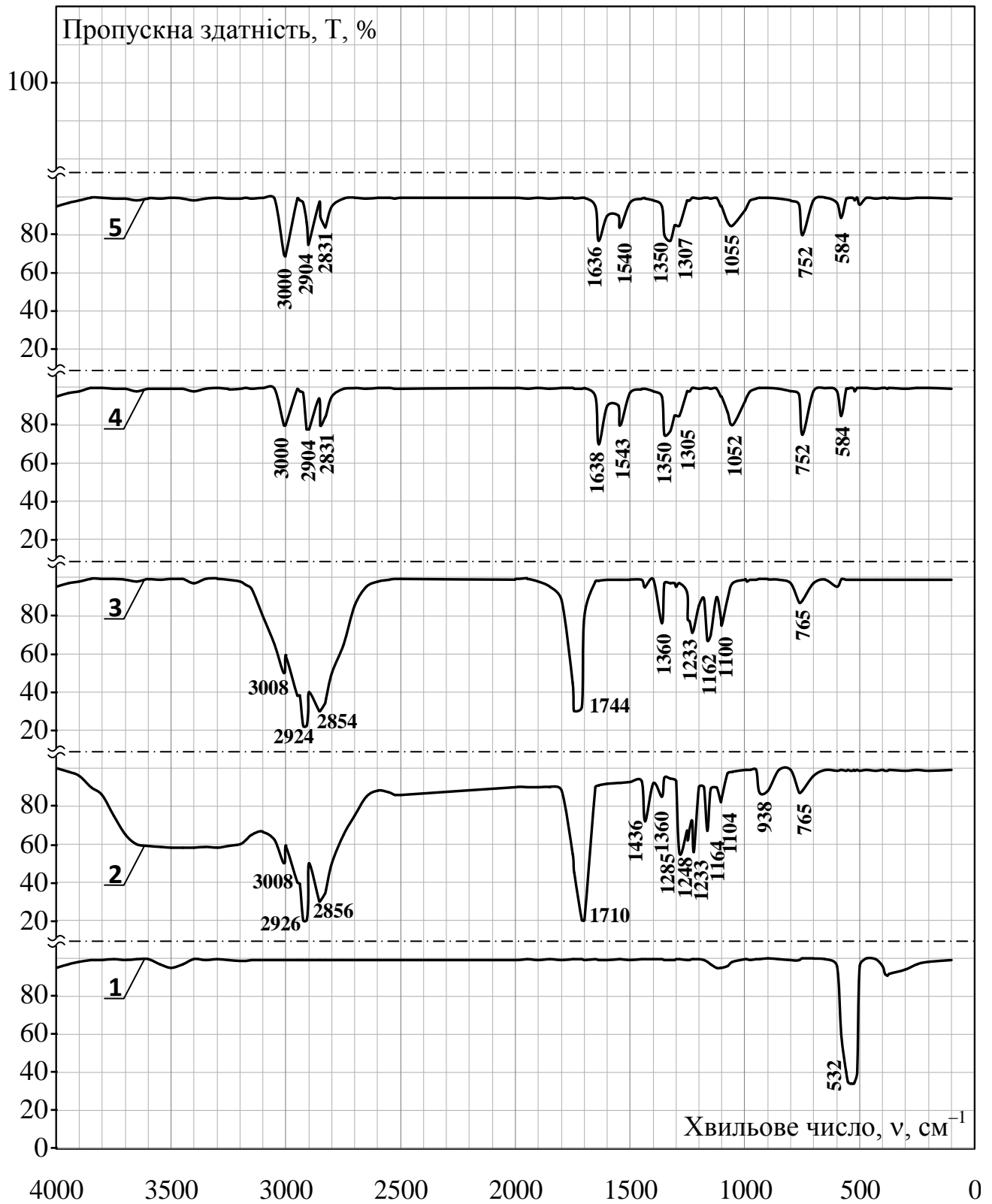


Рис. 4.8. Фур'є-ІЧ-спектри модельних систем «жир+Магнетофуд»: 1 – ХДМ; 2 – лінолева кислота; 3 – соняшникова олія; 4 – «лінолева кислота+Магнетофуд»; 5 – «соняшникова олія+Магнетофуд»

У спектрах лінолевої кислоти (рис. 4.8; 2) і соняшникової олії (рис. 4.8; 3) спостерігаються інтенсивні смуги з максимумами при 2926 см^{-1} , 2856 см^{-1} і 2924 см^{-1} , 2854 см^{-1} відповідно та близько 1360 см^{-1} . На кривих дослідних зразків рис. 4.8; 4 і рис. 4.8; 5 спостерігається зміщення цих смуг поглинання на нижчу частоту – в область: $\nu_{\text{as}} = 2904\text{ см}^{-1}$; $\nu_{\text{s}} = 2831\text{ см}^{-1}$ та $\delta = 1350\text{ см}^{-1}$ відповідно. Це зумовлено формуванням *другого адсорбційного шару* на поверхні наночастинок ХДМ за рахунок електростатичних гідрофобних взаємодій за типом «Ван-дер-Ваальсових комплексів» [475, 500, 502–504].

Отже, ІЧ-спектроскопічними дослідженнями модельних систем: «крохмаль+Магнетофуд», «білок+Магнетофуд», «жир+Магнетофуд» підтверджено хімічну взаємодію поверхні НЧМ з білками, жирами і полісахаридами.

Енергодисперсійна спектроскопія (EDX). Для підтвердження хемосорбції білків, жирів, полісахаридів на поверхні НЧМ використовували метод EDX, за допомогою якого встановлювали хімічний склад модельних систем «крохмаль+Магнетофуд», «білок+Магнетофуд», «жир+Магнетофуд» (рис.4.9). На рентгенівських спектрах усіх дослідних зразків піки близько 0,8; 6,3 і 6,8 кеВ пов'язані з поглинанням кінетичної енергії електронів атомом Fe. Спектри НЧМ, покритих білком, лінолевої кислотою, олією та крохмалем (рис. 4.9, б–д), містять ще два піки: близько 0,27 кеВ і 0,47 кеВ. Ці смуги поглинання належать до атомів С і О [505, 506, 340, 341]. Причому пік при 0,47 кеВ, характерний для атома О, також присутній і в спектрі чистої ХДМ (рис. 4.9, а); а піки близько 0,3 і 1,2 кеВ пов'язані з поглинанням кінетичної енергії електронами атомів N та S відповідно (рис. 4.9, б).

Аналіз EDX-спектрів дослідних зразків (б, в, г, д) показує, що Fe, О і С (Н не може бути досліджений) та N і S (для зразка б) є основними складовими в системі «білок (жир, полісахарид)+Магнетофуд».

Таким чином, системи з НЧМ мають такий хімічний склад: *зразок а* (ХДМ) – Fe 75,5%; О 24,5%; *зразок б* (НЧМ, покриті яєчним білком) – Fe 44,7%; О 26,9%; С 21,4%; N 5,9%; S 1,1%; *зразок в* (НЧМ, покриті крохмалем)

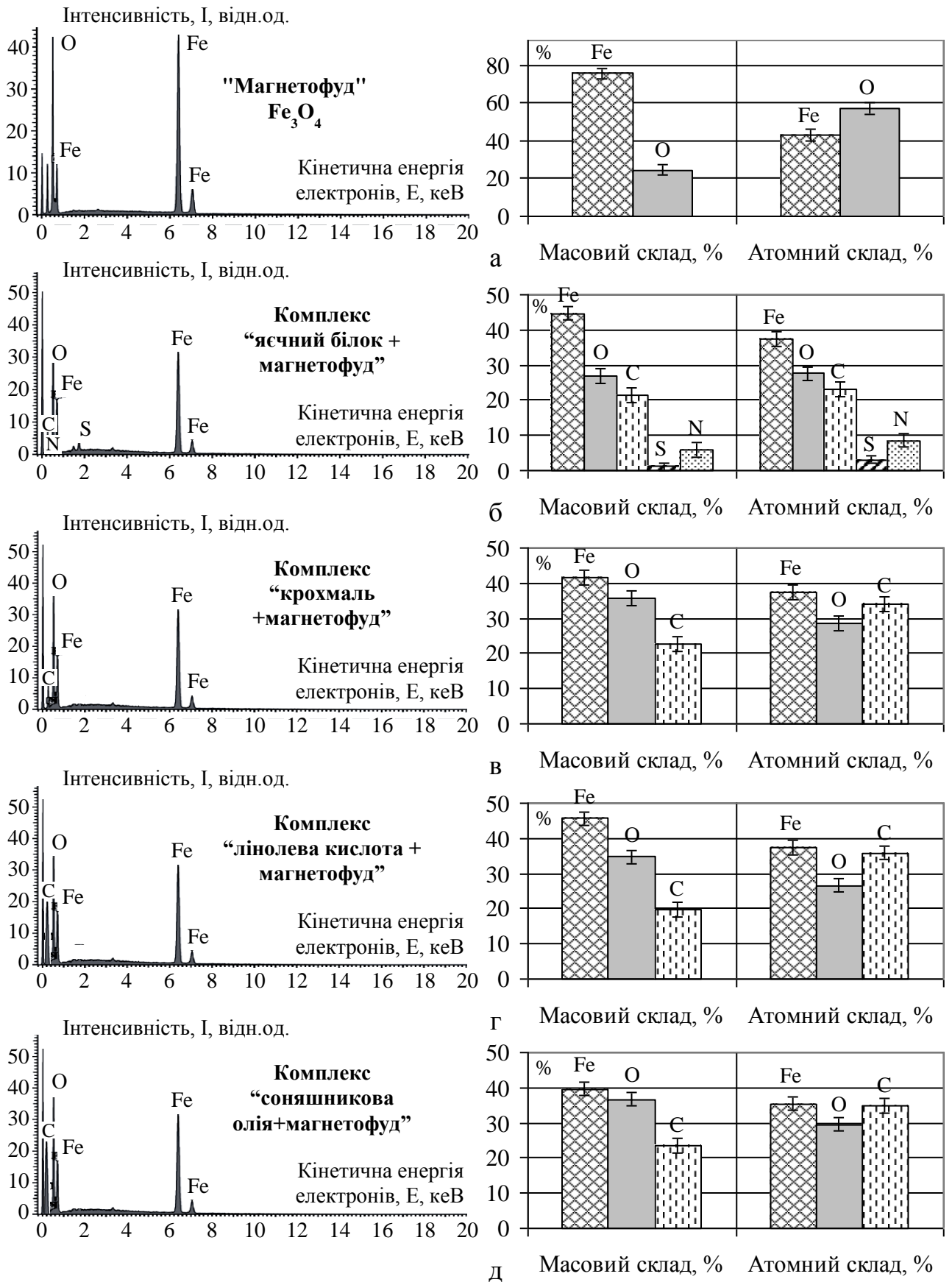


Рис. 4.9. EDX-спектри модельних систем з ХДМ: а – ХДМ; б – «яєчний білок+Магнетофуд»; в – «крохмаль+Магнетофуд»; г – «лінолева кислота+Магнетофуд»; д – «соняшникова олія+Магнетофуд»

– Fe 41,7%; O 35,7%; C 22,6%; зразок *г* (НЧМ, покриті лінолевою кислотою) – Fe 45,6%; O 34,7%; C 19,7%; зразок *д* (НЧМ, покриті соняшниковою олією) – Fe 39,7%; O 36,7%; C 23,67%. Отже, у дослідних зразках (*б–д*) з'являється новий хімічний елемент (С), а в дослідному зразку (*б*) ще два елементи (N і S), які відсутні в чистій ХДМ (зразок *а*). Результат вказує на те, що наночастинки ХДМ були успішно одержані (зразок *а*) й основні речовини харчових систем: білки, жири, полісахариди (зразки *б–д*) хемосорбовані на частинках ХДМ.

Визначення форм зв'язку вологи ХДМ. Для розроблення технологій харчової продукції з використанням ХДМ доцільно дослідити її водопоглинальну здатність (ВПЗ), ступінь набухання (СН) та співвідношення форм зв'язку вологи в модельних системах «вода+Магнетофуд». У табл. 4.3 наведено коефіцієнти водопоглинання ХДМ, визначені на приладі Догадкіна при двох температурах: $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ і $(50 \pm 1) ^\circ\text{C}$ в середовищах, традиційно прийнятих у харчових технологіях [376].

Таблиця 4.3

**Коефіцієнти водопоглинання харчової добавки «Магнетофуд» (ХДМ)
у різних середовищах**

Полярне середовище	Коефіцієнти водопоглинання ХДМ, відн.од.	
	$t=20 \pm 2 ^\circ\text{C}$	$t=50 \pm 2 ^\circ\text{C}$
Натрій гідрокарбонату, рН=6,0	$12,4 \pm 0,4$	$12,8 \pm 0,4$
Розчин етанової кислоти, рН=4,5	$12,8 \pm 0,4$	$13,0 \pm 0,4$
Розчин натрій хлориду, 0,5 %	$13,1 \pm 0,5$	$13,4 \pm 0,5$
Розчин натрій хлориду, 1,7 %	$13,4 \pm 0,5$	$13,5 \pm 0,5$
Розчин сахарози, 1,1 %	$13,6 \pm 0,5$	$13,7 \pm 0,5$
Розчин сахарози, 5,0 %	$13,8 \pm 0,5$	$14,0 \pm 0,5$
Молоко	$12,6 \pm 0,4$	$12,9 \pm 0,4$

Як видно з табл. 4.3, підвищення температури середовища до $(50 \pm 1) ^\circ\text{C}$ сприяє підвищенню гідратаційної здатності ХДМ. А висока водопоглинальна здатність ХДМ зумовлена декількома чинниками, а саме: нанорозмірами частинок із розвиненою активною поверхнею, відповідно, значною площею взаємодії частинок ХДМ із водною фазою та наявністю полярних ділянок і структуроутворювальних катіонів феруму на поверхні, що проявляють виражені гідрофільні властивості та схильність до утворення аквакомплексів.

Динаміка водопоглинальної здатності (ВПЗ) харчової добавки «Магнетофуд» досліджувалася залежно від періоду гідратації (рис. 4.10, а) [14]. Кластерофільність НЧМ та наявність дефектного приповерхневого шару суттєво впливають на інтенсивність гідратації та вологозв'язувальну властивість ХДМ.

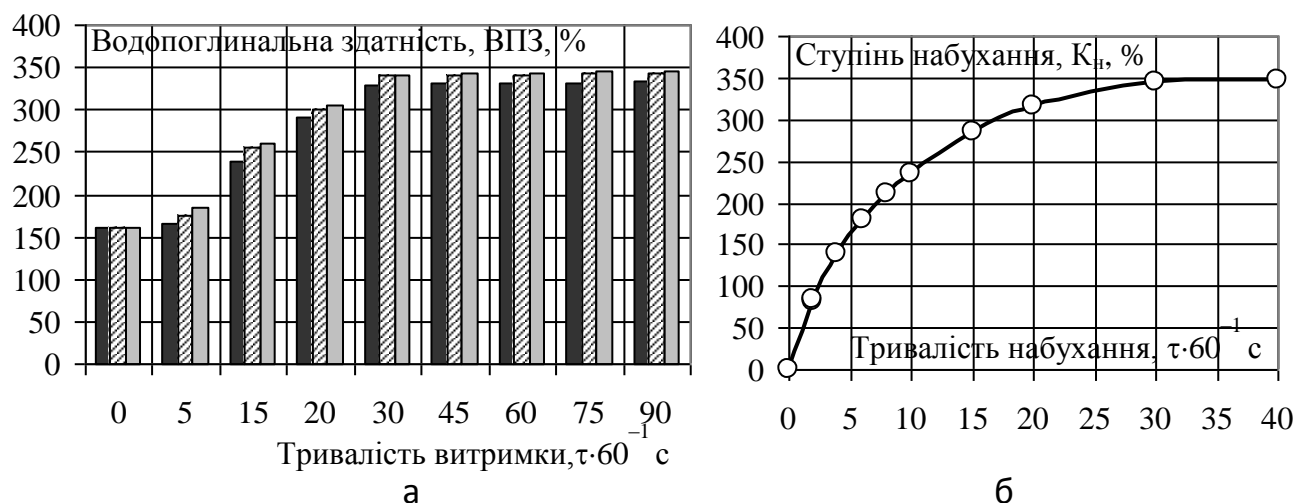


Рис. 4.10. ВПЗ та кінетика набухання (сольватації) ХДМ: а – ВПЗ систем «Магнетофуд+вода» у співвідношенні ХДМ:Н₂О (■ – 1:3; $y=6E-04x^4-0,0102x^3+0,5134x^2-2,7002x+258,32$; $R^2=0,9107$; ▨ – 1:5; $y=6E-04x^4-0,0108x^3+0,5901x^2-4,4714x+260,72$; $R^2=0,9783$; ■ – 1:10; $y=6E-04x^4-0,0108x^3+0,4756x^2-0,6131x+249,86$; $R^2=0,9881$); б – кінетика набухання (сольватації) ХДМ

Так, вага усіх систем «Магнетофуд+вода» (рис. 4.10, а) максимально збільшується в 2,0...2,2 раза за 30х60 с. При цьому, найбільша ВПЗ спостерігається для цих систем зі співвідношенням 1:5 та 1:10, а найменша – 1:3. Ступінь набухання (сольватації) (K_n) ХДМ досліджували у воді при температурі (20±1) °С (рис. 4.10, б), звідки видно, що область при $\tau < 10 \cdot 60 \text{с}^{-1}$ характеризується високою швидкістю набухання (сольватації), що зумовлено заповненням мікродефектів приповерхневого шару добавки водою і адсорбцією на розвиненій поверхні НЧМ молекулами води з утримуванням їх електростатичними силами як у вигляді окремих молекул, так й у вигляді плівки товщиною в кілька молекул. Далі формується аквакомплекс, оскільки зверху утвореної акваплівки (мономолекулярного адсорбційного шару)

виникають наступні аквашари (полімолекулярні адсорбційні шари), що притягуються молекулярними силами (у тому числі, водневими зв'язками). Через $(25\pm 5)\cdot 60$ с процес набухання (сольватації) закінчується і досягає максимальної величини $K_n=340\dots 350\%$.

Масову частку зв'язаної та вільної вологи визначали індикаторним методом (ІМ) за методиками Княгінічева М.І. та Єрмакова А.І. [15] і методом диференційно-термічного аналізу (ДТА) [16] у дослідних зразках ХДМ після набухання при температурі (20 ± 1) °С протягом $(25\pm 5)\cdot 60$ с. (рис. 4.11).

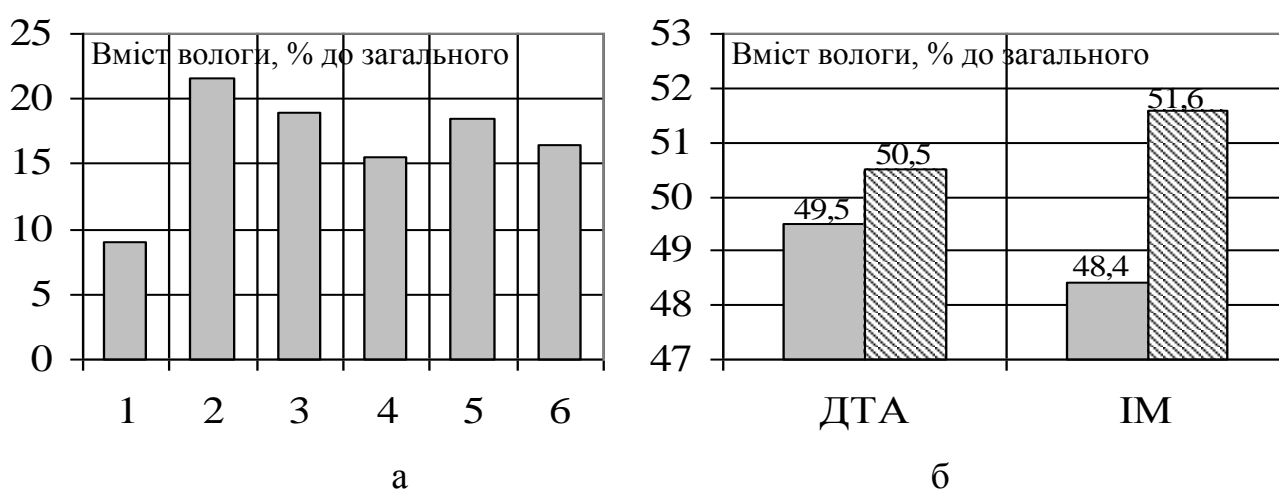


Рис. 4.11. Розподіл води за формами зв'язку у ХДМ після набухання, визначений методами: а – ДТА (1 – вільна волога; 2 – фізико-механічно зв'язана; 3 – осмотично зв'язана (вода набухання); 4 – адсорбційно зв'язана (полімолекулярна); 5 – адсорбційно зв'язана (мономолекулярна); 6 – хімічно зв'язана); б – ІМ) і методом ДТА (■ – кількість вільної, осмотичної та фізико-механічної вологи; ▨ – кількість зв'язаної вологи)

З експериментальних даних рис. 4.11 випливає, що в сольватованій ХДМ 1/5 частини води припадає на хімічно зв'язану вологу; 1/2 – на зв'язану вологу; 1/10 – на вільну вологу і 1/2 частини – на вільну, осмотичну (вода набухання) і фізико-механічну від загальної кількості води.

Проведені дослідження свідчать про високу гідратаційну здатність ХДМ, що в технологіях харчових виробництв може покращувати функціонально-технологічні властивості поліфазних систем.

4.3. Наукове обґрунтування та експериментальне підтвердження водоутримувальної здатності ХДМ

«Кластерно-петельно-ланцюгова» модель водоутримувальної здатності (ВУЗ) ХДМ у харчових системах, які містять одночасно білки та полісахариди (вуглеводи). При низькому рівні гідратації за участю «петель» і «кластерів» утворюється значна кількість протеїн-протеїнових взаємодій у формі β -спіралі (за рахунок електростатичних і координаційних взаємодій з молекулами білків, зумовлюючи розгалуження будови й переплетення білкових макромолекул) (рис. 4.7, а) [475, 500]. Зі збільшенням ступеня гідратації система пластифікується, при цьому наночастинки ХДМ сприяють підвищенню ВПЗ борошна та ВУЗ тіста (рис. 4.12).

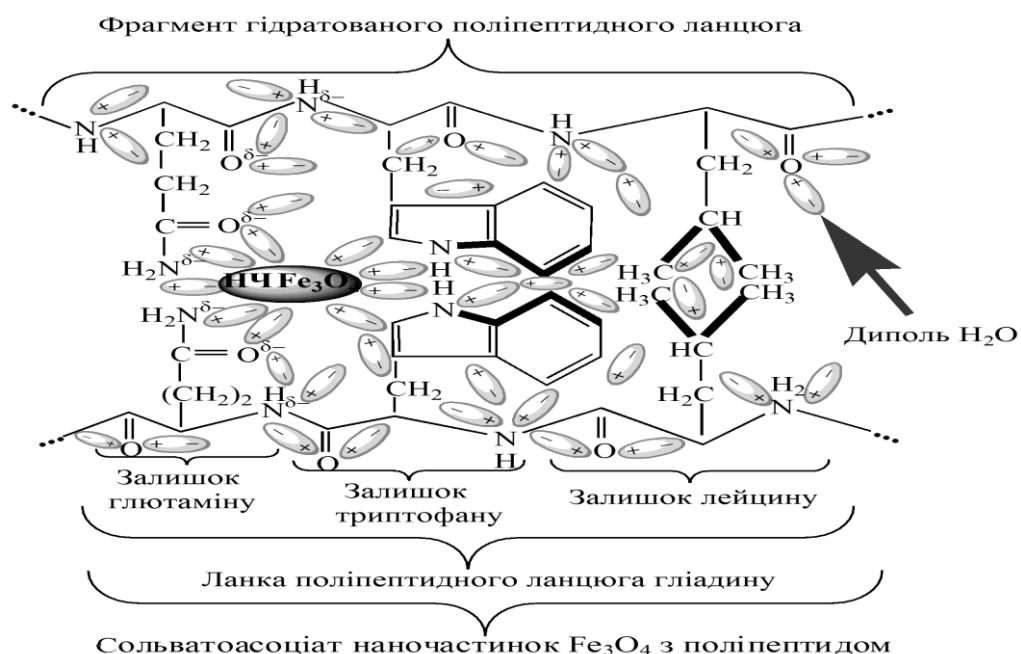


Рис 4.12. Розподіл диполів води в «кластерах» та «петлях» ланок сольватованих поліпептидних ланцюгів гліадину

Дані рис. 4.12 показують, що накопичення води спостерігається навколо полярних НЧМ та в «кластерах» і в «петлях» між двома ланцюгами гліадину, де може затримуватися й інтерміцелярна й інтраміцелярна вода (за рахунок водневих, диполь-іонних і диполь-дипольних зв'язків з НЧМ та гідрофільними групами амінокислотних залишків). І, нарешті, диполі води можуть просто

утворювати водневі зв'язки, не порушуючи міцності. Крім того, бічні розгалуження, що з'явилися в білкової макроструктури, сприяють розсуванню головних ланцюгів, не порушуючи «зшивання». А це полегшує взаємодію білкових макромолекул з диполями води й покращує гідратацію білкових фрагментів.

Таким чином, еластичність глютеніну визначається рівноважним співвідношенням між гідратованими «петлями» і воднево-зв'язаними зонами «ланцюгів», що залежать від ступеня гідратації. А розтяжність у кінцевому підсумку тістових Отже, утворення воднево-зв'язаних ланцюжків є чинником, за допомогою якого в тісті зберігається еластична деформація, яка пояснює збільшення опірності тіста розтягуванню при замісі. Наслідком є підвищення ВУЗ тіста та готових виробів.

«Кластерно-капілярна» модель ВУЗ харчової добавки «Магнетофуд» для розчинів полісахаридів (вуглеводів). При введенні ХДМ в харчові продукти (зокрема, гелеподібного типу) молекули полісахаридів піддаються дії її полярних наночастинок (НЧ). Так, при гідратації полісахаридів у присутності ХДМ утворюється система водневих, гідрофобних, електростатичних, координаційних зв'язків, що сприяє стабільності вуглеводної структури. Механізм цього утворення описаний «кластерно-капілярною» моделлю (рис. 4.13 і 4.7, б): НЧМ адсорбуються на поверхні зерен або в мікрокапілярах твердих частинок, зокрема крохмалю, що сприяє підсиленню електростатичної взаємодії з диполями H_2O (сприяючи утворенню таких колоїдних систем, як гідрофільні золі-гелі (крохмальний клейстер)) [3]. Зростання ступеня розгалуження полімерних ланцюгів амілопектину (або амілози) покращує проникнення H_2O всередину крохмалю (рис. 4.13).

Тобто під впливом НЧМ у крохмалі формуються внутрішньо- та міжмолекулярні асоціати. Їх результатом є виникнення утворень типу «кластерів» та переплетення високогіллястих молекул амілопектину та спіральних ланцюгів амілози в складну мережу (сітчасту або ґратчасту) зв'язаних між собою полімерних молекул (рис. 4.7, б).

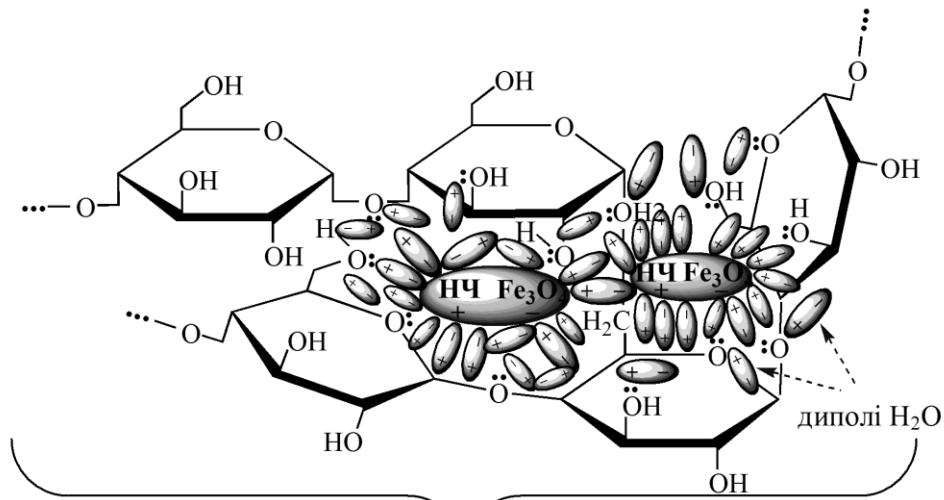
Самі НЧМ є центрами гідрофільності, а «кластери» – утвореннями, які

зв'язують і добре утримують вологу.

Молекули води, утворюючи водневі зв'язки, проникають углиб полісахариду (зокрема, крохмалю) – в найменш організовані ділянки ланцюга макромолекул вуглевода та формують утворення «Магнетофуд+вуглевод» за типом «кластерів». Навколо НЧМ утворюються аквакомплекси, а в «кластерах» виникають сольватасоціати. Це розсуває полімерні ланцюги та покращує проникнення води всередину крохмалю. Така абсорбція води послаблює міжмакромолекулярні зв'язки в щільних шарах і сприяє проникненню вологи в найбільш кристалічні шари. Цей процес проходить через етап гелеутворення, коли крохмальні зерна набухають і збільшуються в об'ємі.

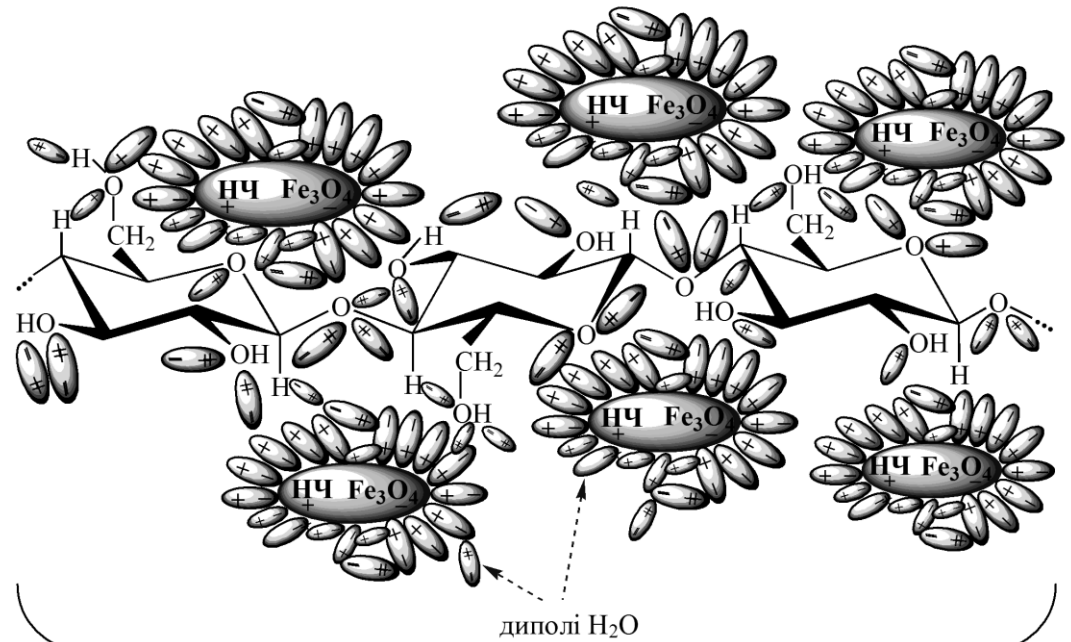
Завдяки відкритій (лінійній нерозгалуженій) будові целюлози (рис. 4.13, б), доступності центрів гідрофільності (НЧМ, ОН–груп та ін.), високій реакційній та комплексоутворювальній здатності полярних НЧМ зростає енергетичний потенціал гідрофільних складових целюлози та покращується: адсорбція диполів H_2O у мікрокапілярах (які побудовані в тривимірну сітчасту структуру); проникнення диполів H_2O всередину целюлози (за рахунок розсування полімерних ланцюгів та послаблення міжмакромолекулярних зв'язків в щільних шарах). У підсумку утворюються сольватасоціати та підвищується водоутримувальна здатність структурного полісахариду (целюлози).

Експериментальне підтвердження водоутримувальної здатності харчової добавки «Магнетофуд» у модельних системах, які містять білки та полісахариди (вуглеводи). На модельних системах «житньо-пшеничне борошно (60:40)+Магнетофуд» і «крохмаль+Магнетофуд» (масова частка ХДМ дорівнює 0,10%; 0,15 %; 0,20 % до маси сировини) досліджували такі функціонально-технологічні властивості ХДМ як водоутримувальна здатність (ВУЗ), набухаємість (Нб) та в'язкість 13% водних суспензій, тому що ці показники характеризують здатність сировинного компонента зв'язувати й утримувати воду, загущувати харчові системи в процесі технологічної обробки.



Сольватокмплекс навколо наночастинок "Магнетофуд"
в "кластері" ланки ланцюга амілопектину

а



Сольватокмплекс навколо наночастинок "Магнетофуд"
в ланці ланцюга целюлози

б

Рис. 4.13. Розподіл диполів води в молекулах полісахаридів (вуглеводів): а – в «кластерах» ланок сольватованих полімерних ланцюгів амілопектину; б – в ланці ланцюга целюлози

З даних рис. 4.14 видно, що використання ХДМ підвищує: Нб в 1,15...1,2 раза для крохмалю та в 1,1...1,3 раза для борошна; ВУЗ – в 1,15...1,3 раза для крохмалю та в 1,15...1,27 раза для борошна (порівняно з контролем).

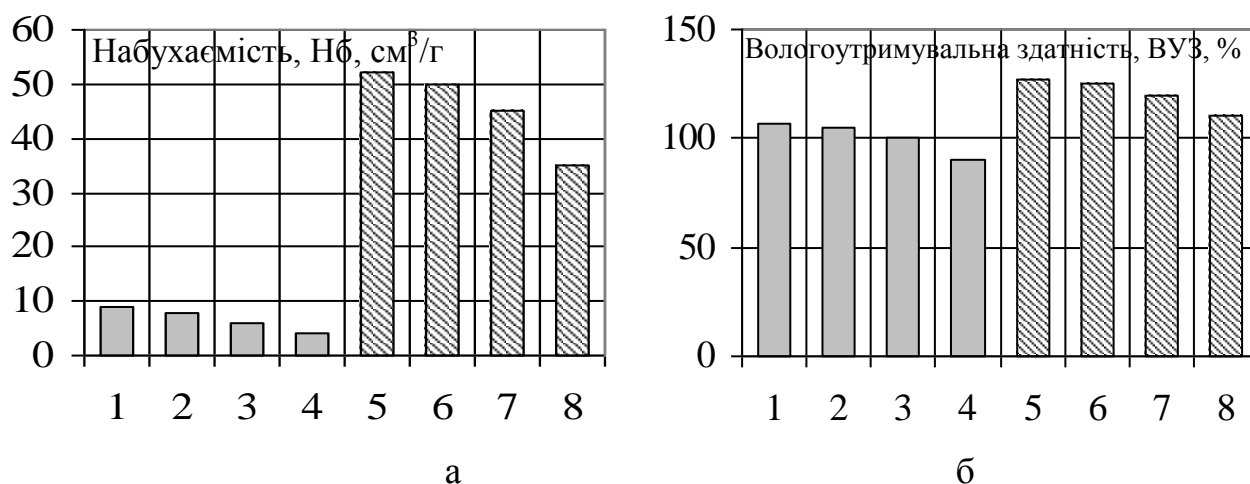


Рис. 4.14. Набухаємість Нб та ВУЗ систем «житньо-пшеничне борошно +Магнетофуд» і «крохмаль+Магнетофуд» з різною кількістю ХДМ, %: а – Нб; б – ВУЗ (1, 5 – житньо-пшеничне борошно, крохмаль з 0,2%; 2, 6 – житньо-пшеничне борошно, крохмаль з 0,15%; 3, 7 – житньо-пшеничне борошно, крохмаль з 0,1%; 4, 8 – житньо-пшеничне борошно, крохмаль – контроль)

Це пов'язано з тим, що НЧМ розгалужують полімерні ланцюги макромолекул, утворюючи «кавітати», «клатрати» та бічні ланцюги, які розсовують головні ланцюги макромолекул білків і полісахаридів [500, 501]. Крім того, наночастинки ХДМ утворюють гідрофільні сольватосоціати з білково-вуглеводними комплексами харчових систем [475], збільшуючи гідратаційну здатність сировинних компонентів, зокрема білків і полісахаридів [392, 476, 496, 507–509].

Під впливом прикладеної зсувної напруги сформовані агрегати поступово руйнуються, причому у зразках з ХДМ повільніше. Це пояснює високу псевдопластичність водних суспензій дослідних зразків крохмалю та борошна. Внаслідок чого їх в'язкість падає (рис. 4.15).

Використання ХДМ (рис. 4.15) підвищує в'язкість водних суспензій крохмалю і борошна при обох температурах (порівняно з контролем) в середньому на 27...31% для крохмалю і на 20...24 % для борошна при

температурі 21...25°C та на 15,0...17% для крохмалю і на 9...11% для борошна при температурі 38...42°C. Тобто процес руйнування внутрішніх структур дисперсної системи гальмується при внесенні в систему ХДМ (за рахунок гелеутворювальної та стабілізуювальної здатності цієї добавки) [392, 476, 496, 507–509].

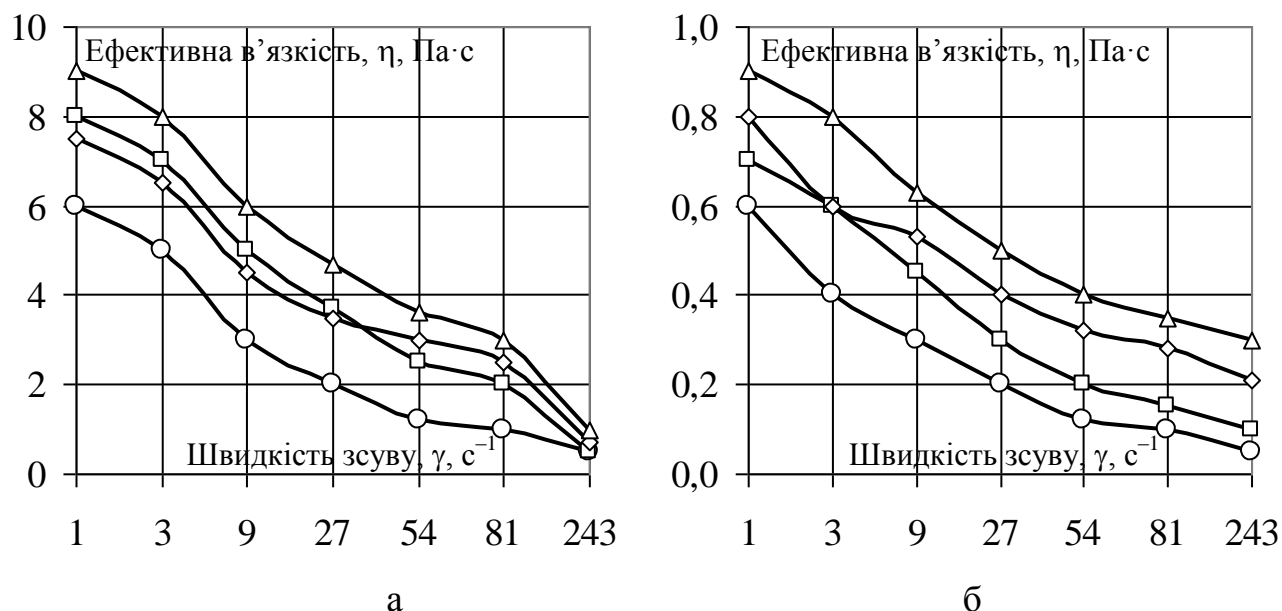


Рис. 4.15. Ефективна в'язкість 13% водних суспензій при різних температурах та масовій частці ХДМ, %: а – «крохмаль+Магнетофуд» (при 23°C: \circ – крохмаль (контроль); \diamond – крохмаль з 0,15% ХДМ; при 40°C: \square – крохмаль (контроль); \triangle – крохмаль з 0,15% ХДМ; б – «житньо-пшеничне борошно+Магнетофуд» (при 23°C: \circ – житньо-пшеничне борошно (контроль); \diamond – житньо-пшеничне борошно з 0,15% ХДМ; при 40 °C: \square – житньо-пшеничне борошно (контроль); \triangle – житньо-пшеничне борошно з 0,15% ХДМ)

Збільшення в'язкості 13% водних суспензій крохмалю і борошна в процесі вистоювання – 30 хв (рис. 4.16) в 1,15...1,35 раза при температурі 21...25°C і в 1,13...1,26 раза при температурі 38...42°C для крохмалю та в 1,1...1,27 раза при температурі 21...25°C і в 1,1...1,22 раза при температурі 38...42°C для борошна (порівняно з контролем) пов'язано з продовженням процесів гідратації і розчинення (за рахунок кластерофільності і амфіфільності ХДМ). Причому внесення в систему ХДМ прискорює і підсилює процеси гідратації й розчинення крохмалю і борошна.

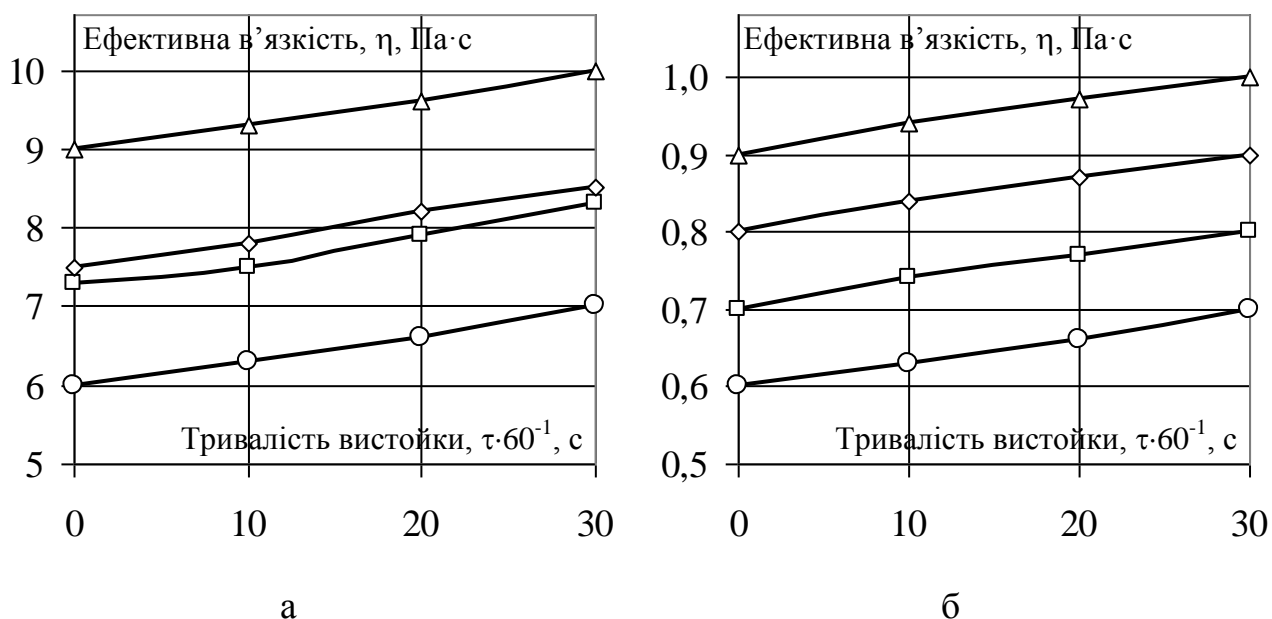


Рис. 4.16. Залежність ефективної в'язкості (швидкість зсуву $\gamma=9 \text{ c}^{-1}$) 13% водних суспензій від часу вистойки при різній кількості ХДМ, %: а – «крохмаль+Магнетофуд» (при 23°C: –○– – крохмаль (контроль); –◇– – крохмаль з 0,15% ХДМ; при 40°C: –□– – крохмаль (контроль); –△– – крохмаль з 0,15%ХДМ; б – «житньо-пшеничне борошно +Магнетофуд» (при 23 °C: –○– – житньо-пшеничне борошно (контроль); –◇– – житньо-пшеничне борошно з 0,15% ХДМ; при 40 °C: –□– – житньо-пшеничне борошно (контроль); –△– – житньо-пшеничне борошно з 0,15% ХДМ)

Внесення в систему ХДМ прискорює і підсилює процеси гідратації й розчинення крохмалю і борошна. Результати досліджень підтверджують загущувальні властивості ХДМ та її здатність до водозв'язування та водоутримання [475, 500, 501]. Ці властивості важливі в геле- та піноподібних, емульсійних та емульсійно-суспензійних системах.

4.4. Вивчення впливу ХДМ на процеси окиснення в жирових системах

Жири та жировмісні продукти піддаються мікробному та окисному псуванню; при тривалому зберіганні відбувається гідроліз, який прискорюється підвищенням вмісту вологи, температури й активності ферменту ліпази [510–512].

Як антиоксидант та стабілізатор жирів запропоновано ХДМ ($\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$), що за рахунок Fe (II) здатна виявляти відновні та антиоксидантні властивості, тому подовжувати термін зберігання жирів та жировмісних продуктів [26– 33]. Досліджували вплив ХДМ (у кількості 0,05 %; 0,1 %; 0,15 % до маси олії) на змінення ступеня окиснення олії при 10-ти разовій термообробці протягом 2 хв при температурі $(180\pm 10)^\circ\text{C}$ (шляхом визначення таких чисел: кислотного (КЧ), йодного (ЙЧ), пероксидного (ПЧ) [364–366]. Значення КЧ (рис. 4.17, а) в усіх дослідних зразках відповідають стандарту, але в системі «нерафінована соняшникова олія+Магнетофуд» з плином часу КЧ

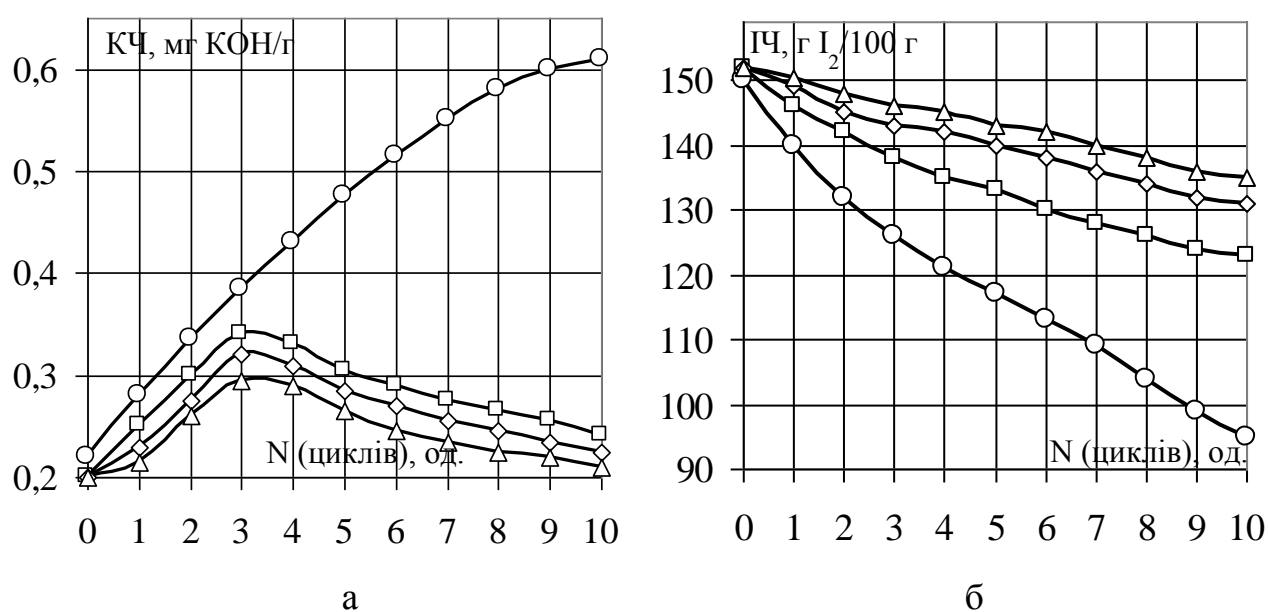


Рис. 4.17. КЧ (а) та ЙЧ (б) у системи «нерафінована соняшникова олія+Магнетофуд» з різною масовою часткою ХДМ, % (10 циклів термоциклічної обробки протягом 2 хв при температурі $t=170\dots 190^\circ\text{C}$): ○ — 0; □ — 0,05; ◇ — 0,1; △ — 0,15

поступово зменшується на 0,075...0,095 мг КОН/г, у той час як в контролі збільшується на 0,46...0,47 мг КОН/г. Крім того, внесення в систему ХДМ зменшує КЧ після 10 термоциклів в 2,7...3,2 раза (порівняно з контролем) за рахунок уповільнення процесів гідролізу олії (накопичення вільних жирних кислот) та сорбції на частинках добавки деякої кількості жирних кислот, покращує її якість та збільшує термін зберігання [264, 265, 466, 495, 513–516]. У системах «нерафінована соняшникова олія+Магнетофуд» ЙЧ (порівняно з контролем) більше на 15...20 %; з плином часу воно зменшується повільніше (внесення в систему ХДМ збільшує ЙЧ після 10 термоциклів в 1,25...1,3 раза)

(рис. 4.17, б). Зниження ЙЧ з кожним наступним термоциклом пов'язано зі зменшенням ступеня ненасиченості вищих жирних кислот внаслідок участі в реакціях окиснення, полімеризації або циклізації. Введення ХДМ в жирову систему уповільнює ці процеси (за рахунок участі НЧМ у електростатичних гідрофобних взаємодіях за типом «ван-дер-ваальсових комплексів») [475, 500, 502–504] та стабілізує жирову систему [502–504]. Первинними продуктами окиснення жирів є гідропероксиди (і пероксиди) [517, 518], про вміст судять за ПЧ (рис. 4.18), яке дозволяє виявити процеси окиснення і появу продуктів псування значно раніше, ніж це може бути встановлено органолептично.

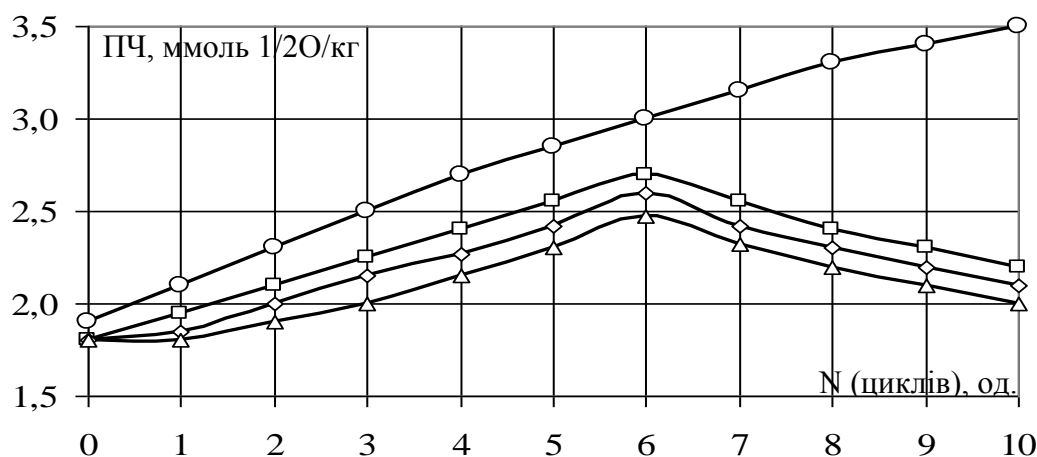


Рис. 4.18. ПЧ у системи «нерафінована соняшникова олія+Магнетофуд» з різною масовою часткою ХДМ, % (10 циклів термоциклічної обробки протягом 2 хв при температурі $t=170...190^{\circ}\text{C}$): ○ – 0; □ – 0,05; ◇ – 0,1; △ – 0,15

Значення ПЧ у системах «нерафінована соняшникова олія+Магнетофуд» не стабільне: спочатку зростає у середньому на $0,77...0,90$ ммоль $1/2\text{O}/\text{кг}$, а потім поступово зменшується, на відміну від контролю, де ПЧ постійно збільшується. Крім того, введення в систему ХДМ (в кількості 0,05 %; 0,1 %; 0,15 % до маси олії) зменшує ПЧ (після 10 термоциклів) в $1,55...1,75$ разів порівняно з контролем. Це пов'язано з утворенням проміжних структуроутворювальних атомів ферума НЧМ з атомами кисню пероксидних радикалів і гідрогенпероксидів [475, 500, 502–504]. Отримані результати за фізико-хімічними показниками КЧ, ЙЧ, ПЧ вказують на антиоксидантні властивості ХДМ (які підтверджуються цитопротекторним ефектом добавки, встановленим доклінічними дослідженнями – Додаток М 1) та можливість її використання в

жирах і жировмісних харчових продуктах з метою поліпшення якості та подовження терміну зберігання.

4.5. Наукове обґрунтування та експериментальне підтвердження жирозв'язування та жирутримання наночастинками ХДМ

«Двошарова координація» – модель жирутримувальної здатності ХДМ. Згідно з *концепцією роботи*, яка передбачає коригування показників якості та безпечності харчової продукції шляхом використання функціонально-технологічного потенціалу наночастинок ХДМ, виникла необхідність у дослідженнях, пов'язаних з визначенням механізму жирозв'язування та жирутримання НЧМ (Fe_3O_4). Жирутримувальна здатність (ЖУЗ) – здатність зв'язувати і утримувати жир – являє собою важливу функціонально-технологічну властивість харчової сировини, що визначає хід технологічних процесів і якість готової продукції.

Суть жирутримувальної здатності НЧМ – моделі «Двошарової координації», яку детально розглянемо далі, полягає в такому: *перший адсорбційний шар* утворюється на поверхні частинок ХДМ (НЧ Fe_3O_4) за рахунок електростатичних взаємодій полярних груп жирів (та вищих жирних кислот) з полярними НЧМ і координаційних зв'язків структуроутримувальних атомів «Fe» ХДМ з карбонільними і гідроксильними атомами «O» карбоксильних груп вільних жирних кислот та з атомами «O» естерних (складноєфірних) груп тригліцеридів жирів (та олій). *Другий адсорбційний шар* – за рахунок електростатичних гідрофобних взаємодій гідрофобних центрів першого моношару й аліфатичних бічних ланцюгів ацильних залишків тригліцеридів та алкільних складових вільних жирних кислот [340, 341]. Взаємодію між гідрофільними центрами тригліцеридів і жирних кислот з НЧМ можна уявити чотирма типами: монодентатна, мостикова (бідентатна), хелатувальна (бідентатна) й іонна взаємодія [340, 341, 505, 506, 519]. Далі наведеними ІЧ-дослідженнями підтверджується механізм утворення

бідентатних комплексів НЧМ з тригліцеридом (1-лінолеїл-2-олеїл-3-ліноленойлгліцерином) та лінолевою кислотою, представлений на рис. 4.19.

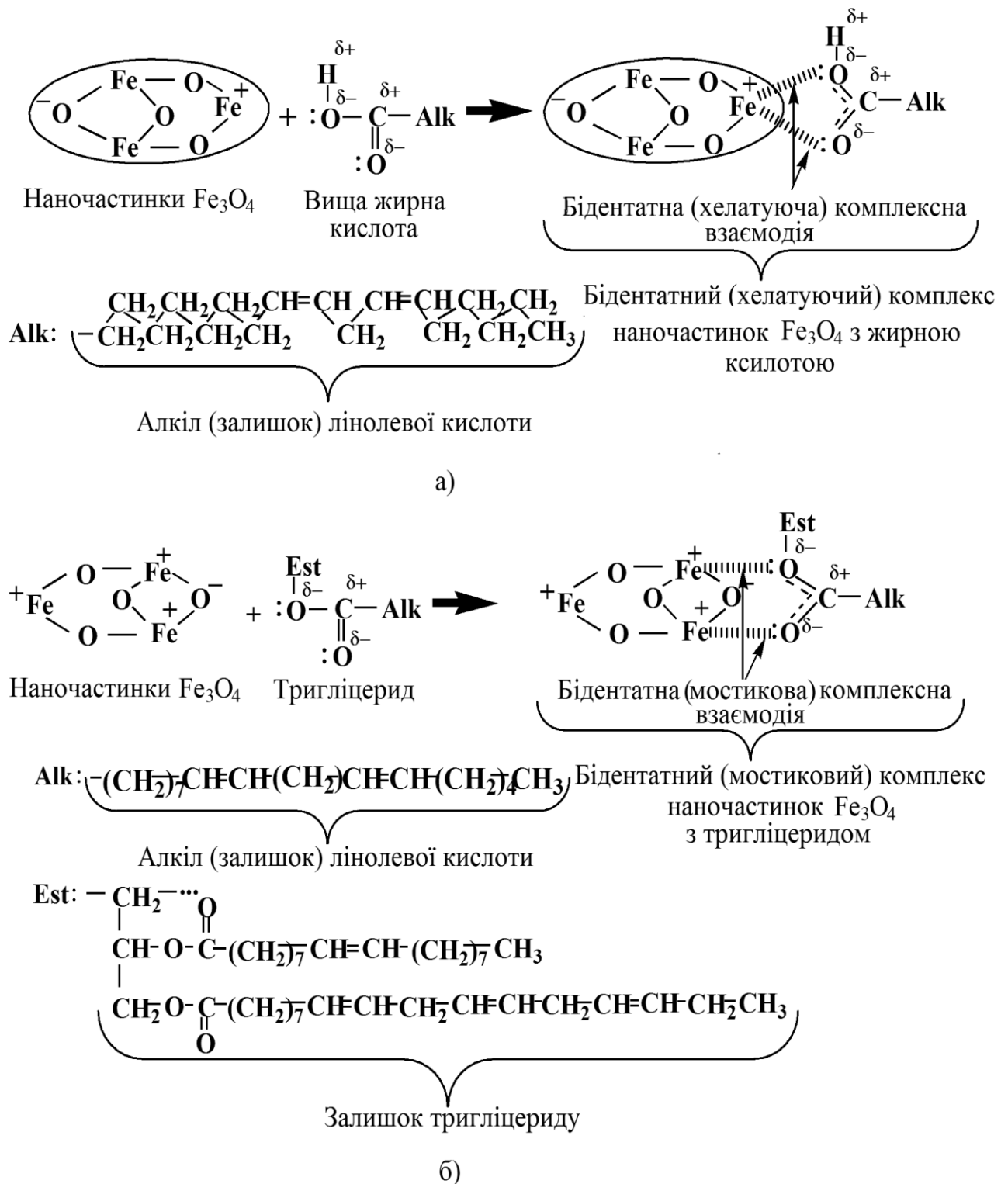


Рис. 4.19. Утворення бідентатних комплексів наночастинок ХДМ (Fe_3O_4) з: а – лінолевою кислотою (хелатувальний комплекс); б – тригліцеридом (мостиковий комплекс)

Односпрямований електростатичний хелатувальний комплекс (рис. 4.19, а) утворюється за рахунок комплексної взаємодії (електростатичної та координаційної) одного катіона феруму НЧМ (HCFe_3O_4), що зв'язується з двома карбоксильними атомами кисню жирної (лінолевої) кислоти. Двоспрямований електростатичний мостиковий комплекс (рис. 4.19, б) утворюється при взаємодії двох катіонів феруму НЧМ (HCFe_3O_4) з двома атомами кисню естерної групи тригліцериду (1-лінолеїл-2-олеоїл-3-ліноленоїлгліцерина). У результаті електростатичних та координаційних взаємодій (рис. 4.19) утворюється *перший адсорбційний шар* на поверхні наночастинок ХДМ, який є *гідрофобним* за рахунок алкільних гідрофобних залишків («хвостів») жирних (зокрема, лінолевої) кислот і тригліцеридів (зокрема, 1-лінолеїл-2-олеоїл-3-ліноленоїлгліцерину). Далі формується *другий адсорбційний шар* за рахунок електростатичної гідрофобної взаємодії: гідрофобна матриця першого адсорбційного шару вступає в електростатичну гідрофобну взаємодію з гідрофобними аліфатичними «хвостами» жирних кислот та тригліцериду та утворенням супрамолекулярного асоціата наночастинок ХДМ за рахунок гідрофобних взаємодій (рис. 4.20).

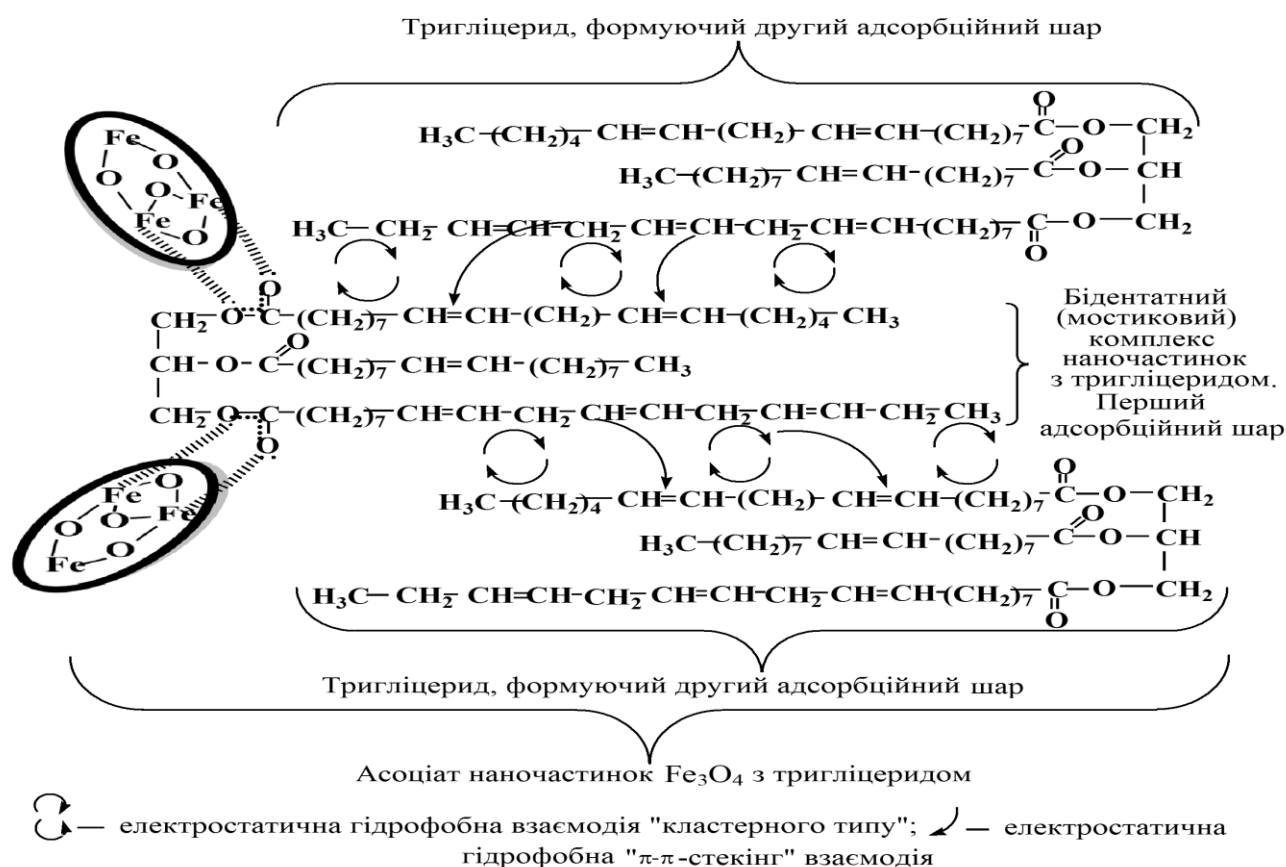


Рис. 4.20. Супрамолекулярний асоціат наночастинок ХДМ з тригліцеридом (1-лінолеїл-2-олеоїл-3-ліноленоїлгліцериним) 3

З рис. 4.20 видно, що наночастинки ХДМ утворюють супрамолекулярні асоціати з жирами, зокрема з 1-лінолеїл-2-олеїл-3-ліноленойлгліцерином. Отже, другий адсорбційний шар формується за рахунок появи дисперсійних сил в досить протяжних молекулах тригліцеридів (та вищих жирних кислот), у яких є можливість багатоцентрової дисперсійної взаємодії. У результаті алкільна матриця жирів структурується за типом «ван-дер-ваальсових комплексів», формуючи другий шар і асоціат з НЧМ.

Експериментальне підтвердження моделі «Двошарової координації» жирутримувальної здатності ХДМ. Фур'є-ІЧ-спектроскопія. З аналізу ІЧ-спектроскопічних досліджень (рис. 4.8) випливає, що молекули лінолевої кислоти і соняшникової олії, що знаходяться в адсорбованому стані на поверхні наночастинок ХДМ, перебувають під дією поля твердої поверхні НЧМ. Унаслідок цього на ІЧ-спектрах дослідних зразків (рис.4.8; 4, 5) з'являються нові смуги поглинання, а деякі характеристичні смуги зрушуються в область більш низьких частот, що вказує на хемосорбцію жирів, зокрема лінолевої кислоти і тригліцеридів соняшникової олії, на поверхні НЧМ [39, 42–45, 72]. Зокрема, з даних (рис. 4.8) зрозуміло, що відмінності в значеннях хвильових чисел ($\Delta\nu_o$) між смугами асиметричних (ν_{as}) і симетричних (ν_s) валентних коливань карбоксилатної групи ν_{as} ($-\text{COO}^-$) і ν_s ($-\text{COO}^-$) (на ІЧ-спектрі – рис. 4.8; 4, 5) можна використовувати для ідентифікації типу взаємодії між карбоксилатом (COO^-) жиру та атомом металу (зокрема Fe) НЧМ.

Найбільше відхилення хвильового числа $\Delta\nu_o$ (200–320 cm^{-1}) відповідало монодентатної взаємодії, а найменше – $\Delta\nu_o$ (<110 cm^{-1}) – хелатувальній (бідентатній). Середнє відхилення $\Delta\nu_o$ (140–190 cm^{-1}) характерно для мостикової (бідентатної) взаємодії. У нашій роботі значення $\Delta\nu_o$ дорівнює $\approx 100 \text{ cm}^{-1}$ (1638 – 1543 = 95 cm^{-1} – для зразка 4; 1636 – 1540 = 96 cm^{-1} – для зразка 5) та вказує на існування бідентатної структури, де два атоми кисню карбоксильної групи жиру координаційно зв'язані з поверхневими атомами ферума НЧМ (рис. 4.8 і рис. 4.19).

Таким чином, перший адсорбційний шар на поверхні НЧМ є комбінацією симетрично зв'язаних молекул жиру під кутом до поверхні наночастинок.

Перпендикулярно поверхні наночастинки ХДМ розташовуються вільні вуглеводневі ланцюги тригліцеридів соняшникової олії і вільних жирних кислот, що зв'язані НЧМ. Ці ланцюги мають супергідрофобність і є матрицею для електростатичної гідрофобної взаємодії з гідрофобними «хвостами» жирів, що формує другий адсорційний шар (рис. 4.8 та рис. 4.20).

Дослідження дисперсності та морфології дослідних зразків систем «жир+Магнетофуд» методом просвічуальної електронної мікроскопії (ТЕМ). Розмір і морфологія частинок у дослідних зразках: ХДМ; систем – «лінолева кислота+ Магнетофуд» і «соняшникова олія+Магнетофуд» були вивчені з використанням ТЕМ (рис.4. 21).

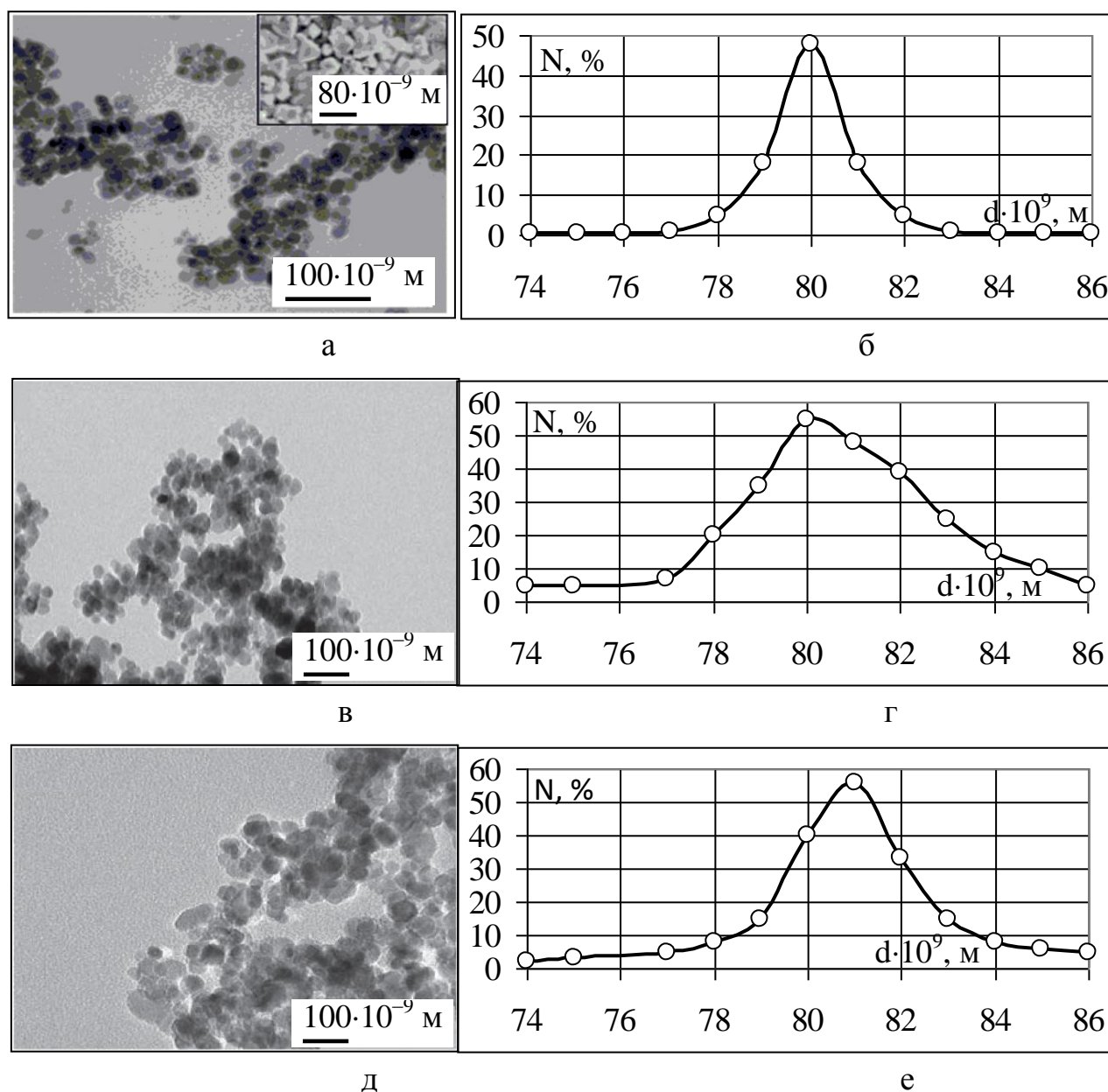


Рис. 4.21 Мікроструктура (а, в, д) та діаграми розподілу частинок за діаметром (б, г, е) у дослідних зразках «жир+Магнетофуд»: а, б – ХДМ; в, г – «лінолева кислота+Магнетофуд»; д, е – «соняшникова олія+Магнетофуд»

Як видно з рис. 4.21, усі дослідні зразки частинок є нанорозмірними, сферичними за формою і мають рівномірний розподіл за діаметром (функція розподілу достатньо вузька та симетрична – рис. 4.21, б, г, е), що свідчить про однорідність з невисоким ступенем полідисперсності. Встановлений порядок середнього діаметру частинок становить: для зразка 1 – $\langle d \rangle \sim 78 \pm 2,36$ нм; для зразка 2 – $\langle d \rangle \sim 80 \pm 2,57$ нм; для зразка 3 – $\langle d \rangle \sim 81 \pm 2,93$ нм. Збільшення розміру частинок ХДМ в дослідних зразках 2 і 3 порівняно з чистими наночастинками ХДМ (зразок 1) пов'язано з процесами хемосорбції лінолевої кислоти і соняшникової олії на поверхні наночастинок ХДМ. Це є додатковим підтвердженням запропонованої моделі «Двошарової координації», сутність якої полягає в утворенні двох мономолекулярних шарів на поверхні НЧМ, сумарна товщина яких дорівнює двом діаметрам молекул жиру (зокрема, лінолевої кислоти і соняшникової олії). Тобто сумарна товщина адсорбційного шару, що становить $2d$ жиру, дорівнює: для лінолевої кислоти (зразок 2) – $2d = 2 \cdot (1,10 - 1,25)$ нм = $(2,2 - 2,5)$ нм; для соняшникової олії (зразок 3) – $2d = 2 \cdot (1,4 - 1,6)$ нм = $(2,8 - 3,2)$ нм.

Визначення жирозв'язувальної здатності ХДМ. Важливими функціонально-технологічними властивостями харчових добавок є жирозв'язувальна (ЖЗЗ) та жирутримуюча здатність (ЖУЗ), що впливають на пластичність, вихід, органолептичні показники харчової продукції. Жирозв'язувальну здатність ХДМ визначали в різних жирах (рис. 4.22) [393, 394].

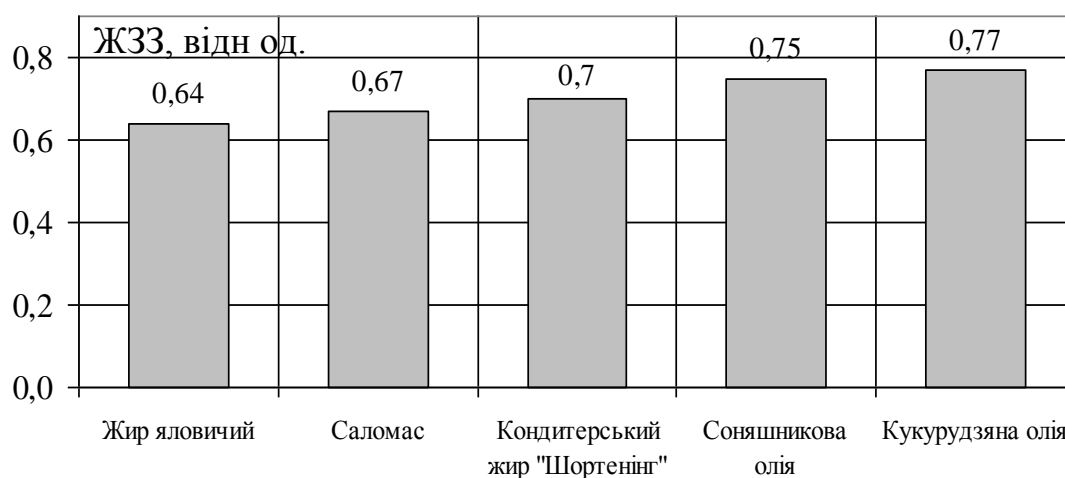


Рис. 4.22. Жирозв'язувальна здатність ХДМ в різних жирах

Встановлено зсув жирозв'язувальної здатності ХДМ в бік зростання для олій порівняно з твердими жирами за рахунок π - π -Стекінг гідрофобних взаємодій, що підтверджується запропонованою моделлю жирутримувальної здатності добавки «Двошарової координації».

Крім того, висока жирозв'язувальна здатність ХДМ (рис.4.22) є передумовою кращого зв'язування жиру під час формування структури м'ясної, рибної і борошняної продукції.

4.6. Наукове обґрунтування та експериментальне підтвердження емульгувальної здатності харчової добавки «Магнетофуд»

Використання наночастинок мінерального походження (зокрема оксидів заліза) у складі емульсій, які здатні до структуроутворення та стабілізації системи, вивчені недостатньо. А це, згідно з *науковою концепцією роботи*, може сприяти створенню харчової продукції з регульованим складом та з функціонально-технологічними властивостями. У зв'язку з цим останнім часом все більшу увагу дослідників привертають «пікерінг-стабілізації» гетерогенних дисперсних систем шляхом використання твердих наночастинок [254, 520]. Одним з таких стабілізаторів пропонуємо ХДМ. Чинником, який визначає стабілізувальні властивості твердих порошків, є змочування їх поверхні компонентами емульсії, яке може регулюватися обробленням їхньої поверхні гідрофільними або гідрофобними модифікаторами [254, 520–522].

Проведеними дослідженнями доведено волого- і жирутримувальна здатність [340, 341, 475, 500, 501]; поверхнево-активні (ξ -потнціал=34...44 мВ; табл. 35, табл 3.8) [263] і амфіфільні властивості ХДМ (рис. 3. 23 – у першому випадку крапля емульсії «вода+олія+Магнетофуд» змочує поверхню олії і розтікається по ній, що свідчить про утворення емульсії типу о/w; у другому випадку крапля емульсії «олія+вода+Магнетофуд» не змочує поверхню олії, прагнучи набути форму, близьку до сферичної, що говорить про утворення емульсії типу о/w). Доведено можливість утворення емульсій типів w/o «вода в

олії» і о/в «олія в воді» (при цьому тверді наночастинки ХДМ адсорбуються на межі розділу фаз («вода-олія» або «олія-вода»)) рис. 4.23 та рис. 4.24.

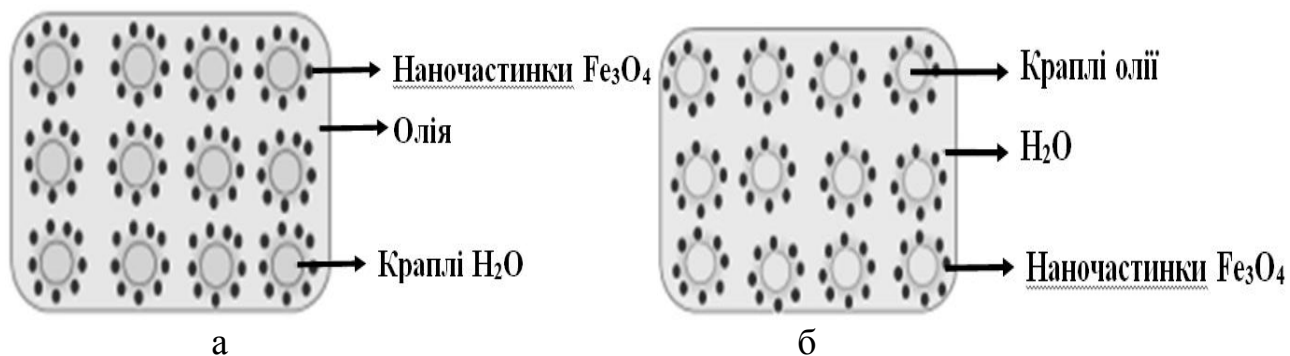


Рис. 4.23. Типи Пікерінг-емульсій: а – емульсія w/o «вода в олії»; б – емульсія о/в «олія в воді»

Порівняння фотографій емульсій (рис.4.24) показує, що введення ХДМ в емульсійну систему збільшує дисперсність крапель емульсії.

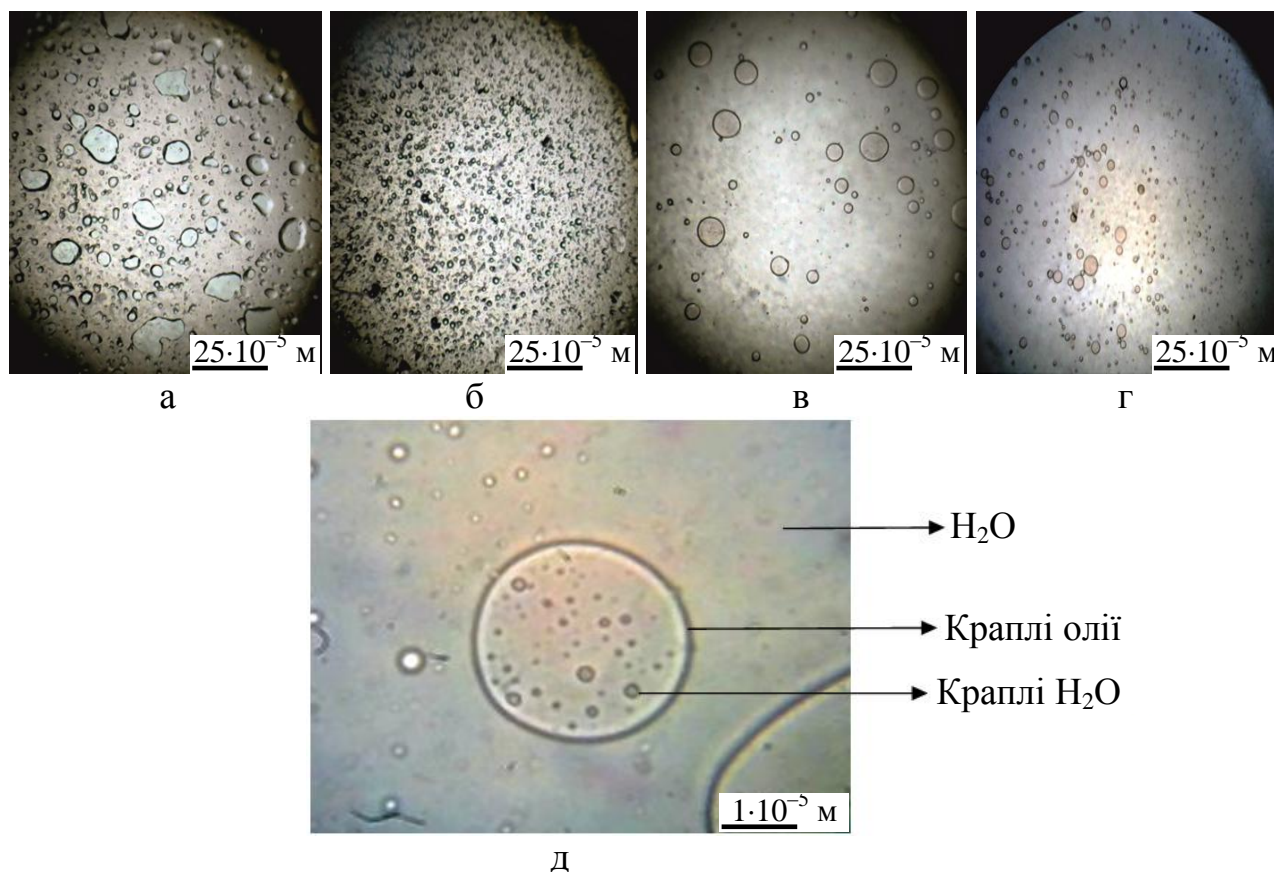


Рис. 4.24. Фотографії (x40 разів для а–г; x1000 разів для д) емульсійних систем: а – «вода+олія+олеат кальцію»; б – «вода+олія+Магнетофуд»; в – «олія+вода+олеат натрію»; г – «олія+вода+Магнетофуд»; д – «вода+олія+вода+Магнетофуд»

Слід зазначити, що краплі емульсій о/в мають набагато більш правильну сферичну форму (рис. 4.24, в, г) порівняно з емульсіями типу w/o (рис. 4.24, а, б). Це пов'язано зі зменшенням енергії Гіббса при використанні наночастинок «Магнетофуд» (НЧМ) за рахунок зниження міжфазного поверхневого натягу в емульсійній системі. Тверді наночастинок адсорбуються на поверхні розділу фаз, зменшуючи площу поверхні інтерфейсу w/o (або о/в) та утворюючи міцні плівки на поверхні крапельок. Зростання тривалості механічного оброблення «пікерінг-емульсій» приводить до утворення множинних емульсій з високою дисперсністю (рис.4.24, д). У табл. 4.4 наведено розміри крапель і тип емульсій.

Таблиця 4.4

Тип емульсій та їх дисперсність

Характеристика емульсії	Тип стабілізатора емульсії			
	Олеат кальцію	НЧМ	Олеат натрію	НЧМ
Розмір частинок емульсії, мкм	15–60	3–5	25–55	2–4
Тип емульсії	w/o		o/w	
Розмір частинок множинної емульсії, мкм	НЧМ		НЧМ	
	Первинна емульсія w/o	Вторинна емульсія w/o/w	Первинна емульсія o/w	Вторинна емульсія o/w/o
	3–5	0,15–0,25	2–4	0,15–0,25

З даних табл. 4.4 випливає, що НЧМ сприяють збільшенню дисперсності емульсійних крапель (порівняно з емульсіями, що стабілізовані олеатом кальцію і олеатом натрію) за рахунок здатності твердих наночастинок до Пікерінг-стабілізації, що підсилюється властивостями ХДМ (поверхневою активністю, амфіфільністю, високим електрокінетичним потенціалом та наявністю на поверхні НЧМ структуроутворювальних атомів феруму).

Досліджувалася стійкість дослідних зразків емульсійних систем «вода+олія+Магнетофуд» (відразу після приготування та після нагрівання протягом 35...40 хв при 60...65°C та кріообробки протягом 35...40 хв при (-5...-7°C) із застосуванням центрифуги по відношенню об'єму незруйнованої емульсії до об'єму зразка, взятого для аналізу [367, 368], та емульгувальна

здатність (ємність) за методикою Гурова О.М., визначаючи точку інверсії фаз [367, 394]. Дослідні зразки емульсій готували шляхом диспергування у водній фазі емульгатора рафінованої дезодорованої соняшникової олії, де як емульгатор використовували колоїдний розчин 0,05%; 0,1%; 0,15 %; 0,2 %; 0,25 %; 0,30 %; 0,35 % ХДМ, що утворює водну фазу емульсії, у якій емульгували жирову фазу; у контролі вміст ХДМ становить 0 %. На рис. 4.25 наведено емульгувальну ємність ХДМ у емульсійних системах «вода+олія+Магнетофуд».

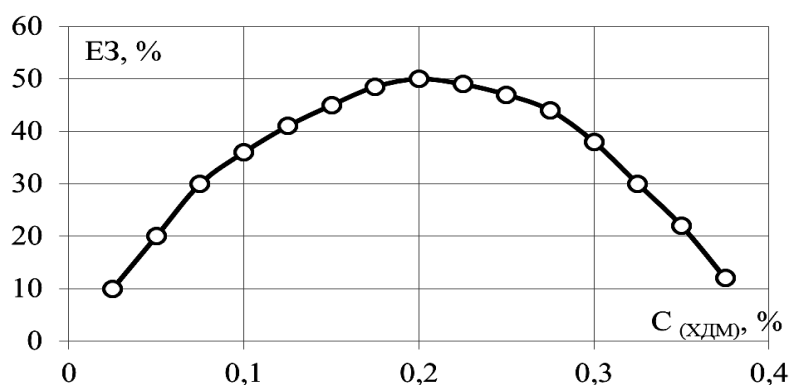


Рис. 4.25. Залежність точки інверсії фаз емульсійної системи «вода+олія+Магнетофуд» від масової частки ХДМ

Як видно з рис. 4. 25 максимальна емульгувальна ємність ХДМ в емульсії «вода – олія» становить 50 %. Доведено ефективність коригування стійкості харчових емульсій у разі введення ХДМ («вода+олія+Магнетофуд»). Дискретне варіювання масової частки ХДМ від 0,10% до 0,20% збільшує кінетичну ($SE_{\text{кін}}$) й агрегативну стійкість ($SE_{\text{агр}}$) у прямих емульсіях на основі олії в середньому в 1,2 раза (рис. 4. 26).

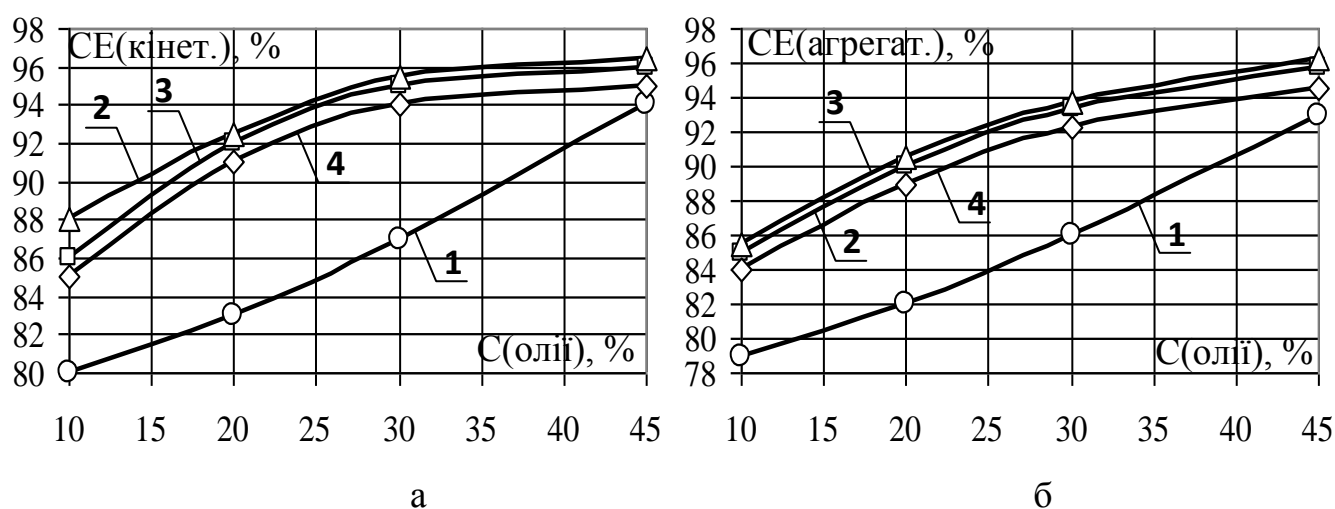


Рис. 4.26 Стійкість дослідних зразків емульсійної системи «вода+олія+Магнетофуд» (кінетична $SE_{\text{кінет.}}$ (а) та агрегативна $SE_{\text{агрегат.}}$ (б)) з різними масовими частками олії та ХДМ, %: 1 – 0,1; 2 – 0,15; 3 – 0,2; 4 – 0,25

Тобто приблизно в рівній мірі проявляються поверхнево-активні властивості (агрегативна стійкість збільшується) і вологоутримувальна здатність (кінетична стійкість зростає) ХДМ. Рациональний вміст добавки дорівнює 0,15 % від маси колоїдного розчину. Крім того, в емульсійних системах «вода+олія+Магнетофуд» після термо- та кріообробки кінетика стійкості спадає більш повільно зі збільшенням масової частки ХДМ (рис. 4.27).

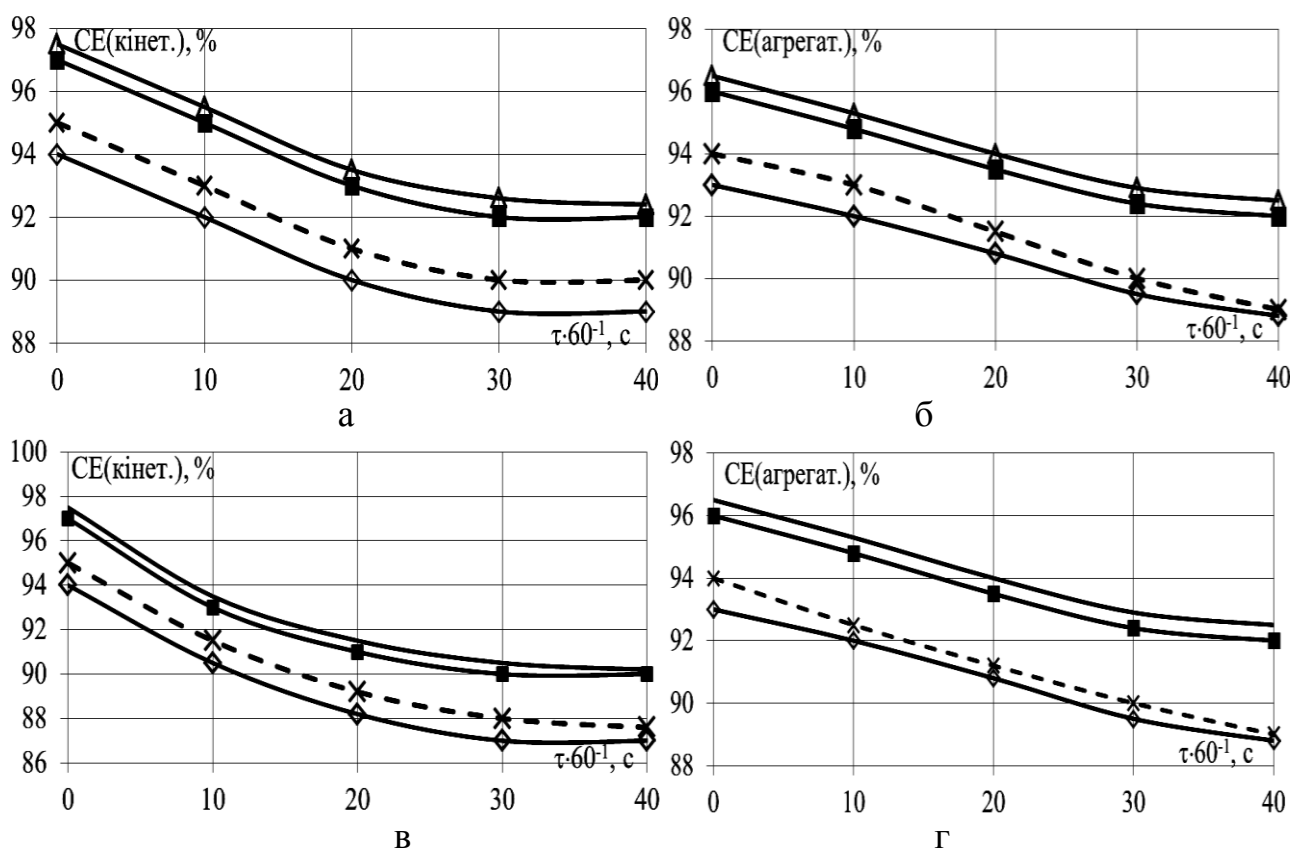


Рис. 4.27. Стійкість дослідних зразків емульсійної системи «вода+олія+Магнетофуд» (кінетична $SE_{(кінет.)}$ (а, в) та агрегативна $SE_{(агрегат.)}$ (б, г)) після термо- (а, б) та кріообробки (в, г) з різними масовими частками олії та ХДМ, %: —◇— — 0,1; —×— — 0,15; —■— — 0,2; — — — — 0,25

Тобто кінетична та агрегативна стійкість емульсійних систем «вода+олія+Магнетофуд» зменшується: після термообробки на 4,5...5,5%; після кріообробки — на 6,5...7,5% за рахунок стабілізуювальної дії ХДМ та термостабільності (збереженню її поверхневої активності в широкому температурному інтервалі). Доведено, що основними механізмами при цьому є Пікерінг-ефект, підсилений амфіфільністю

НЧМ. За раціональний вміст ХДМ для емульсійних систем обрано 0,15% від маси колоїдного розчину.

Отже, ХДМ завдяки полярній, хімічно активній і розвиненій поверхні її наночастинок, здатних до електростатичних і координаційних взаємодій з водно-жировою фазою емульсій, підвищує стійкість емульсійних систем. А це є передумовою кращого емульгування під час формування структури, стабілізування та зберігання емульсійних продуктів.

4.7. Вивчення загущувальних, тиксотропних властивостей ХДМ та її впливу на геле- та піноутворення

Згідно з науковою концепцією роботи наночастинок мінерального походження (зокрема, оксиди заліза) мають певний функціонально-технологічний потенціал для створення якісної харчової продукції з подовженим терміном зберігання. Зокрема, вони можуть коригувати структурно-механічні властивості дисперсних систем, впливати на геле- та піноутворювач, вступаючи з ними в хімічні й електростатичні взаємодії [475, 500, 501]. Тому, наночастинок оксидів заліза можуть виконувати одразу декілька технологічних функцій в системі: виконувати роль стабілізатора, загусника і структуроутворювача [263, 402, 523]. Однак ці питання вивчені недостатньо, тому виникла необхідність у дослідженнях, пов'язаних з визначенням загущувальних та тиксотропних властивостей наночастинок ХДМ (Fe_3O_4).

Слід зазначити, що загущуючі та структуроутворюючі властивості ХДМ були розглянуті на модельних колоїдних системах житнє-пшеничного борошна та крохмалю (див. п. 4.3) і в роботі [524]. Дослідження реологічних властивостей дослідних зразків водних розчинів «гелеутворювач+Магнетофуд» з різними гелеутворювачами (пектин, агар) та з різною масовою часткою ХДМ (0,1%; 0,15%; 0,20% від маси розчину) здійснювали на ротаційному віскозиметрі Реотест-2 згідно інструкції [405] (рис. 4.28). З рис.4.28 видно, у всіх дослідних зразках водних розчинів гелеутворювачів при введенні ХДМ

збільшується в'язкість у всьому діапазоні напруження зсуву: $\gamma = (1,5-40) \text{ c}^{-1}$ в (1,22...1,27) раза для агару та в (1,24-1,29) раза для пектину (порівняно з контролем) за рахунок хімічного потенціалу структуроутворювальних катіонів Fe^{2+} і Fe^{3+} на поверхні НЧМ та координаційної і електростатичної взаємодії наночастинок з макромолекулами полісахаридів.

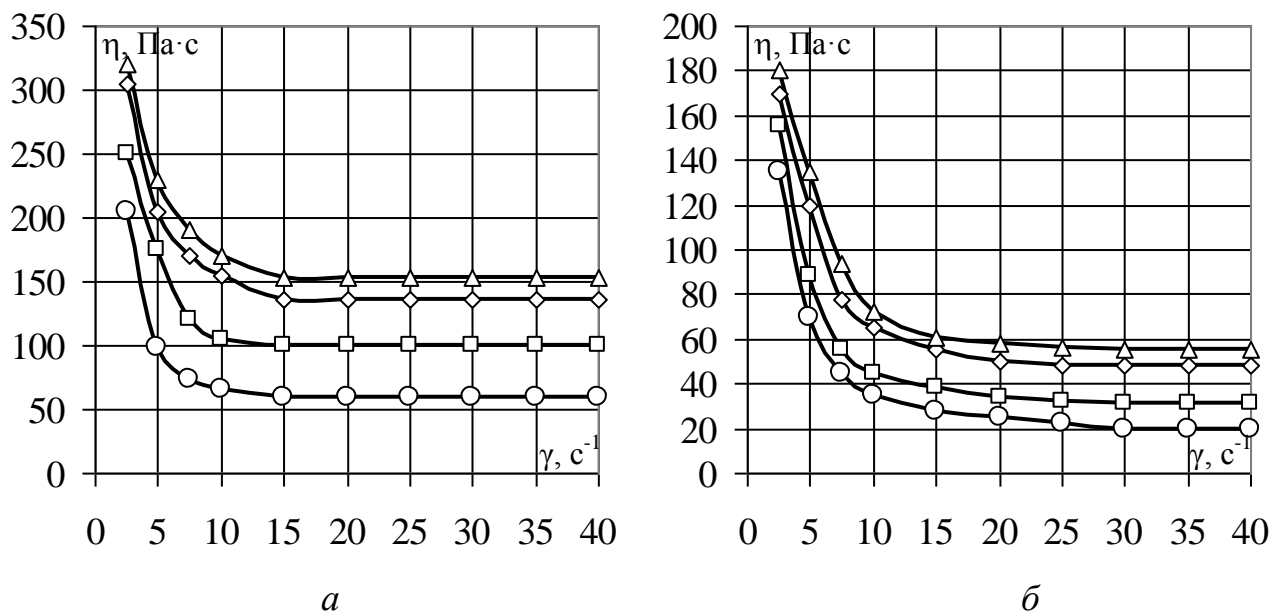


Рис. 4.28. Ефективна в'язкість η водних розчинів «гелеутворювач +Магнетофуд» з різною кількістю ХДМ, %: а – на агарі; б – на пектині (—○— – контроль, —□— – 0,1, —◇— – 0,15, —△— – 0,2)

Завдяки чому утворюється просторова сітка, побудована молекулами гідроколоїдів, що структуровані наночастинками ХДМ. Рациональною кількістю ХДМ є 0,15%, подальше збільшення практично не впливає на зміну в'язкості розчинів гелеутворювачів.

Особливий інтерес становить вивчення впливу механічної обробки на реологічні властивості дослідних зразків водних розчинів гелеутворювачів, зокрема, коефіцієнта тиксотропного відновлення їх первинної структури (рис. 4.29). Після припинення механічного впливу протягом 15...20 хв відбувається поступове відновлення структури. Причому, якщо взяти значення в'язкості в початковий момент часу до руйнування структури за 100%, то після її відновлення цей показник для контролю знижується на 46...47%. А для

дослідних зразків з ХДМ на 18...21%. Зокрема, при додаванні ХДМ в розчини гелеутворювача (пектину або агару) збільшується коефіцієнт тиксотропії $K_{\text{тикс.}}$ в середньому в 1,4...1,5 раза.

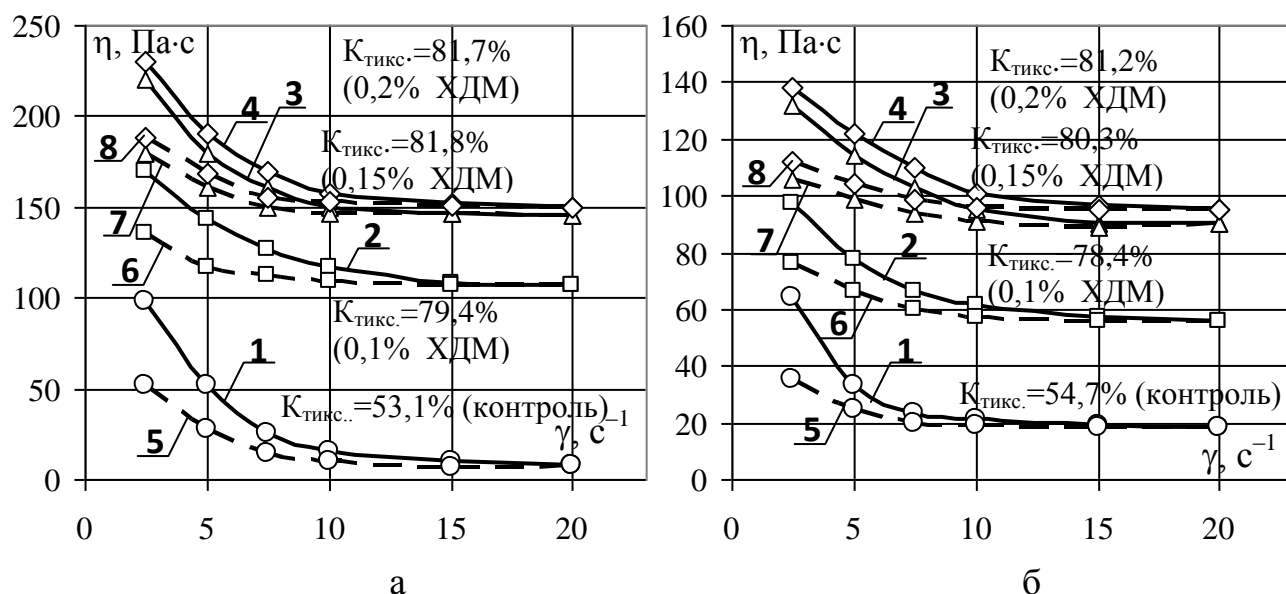


Рис. 4.29. Ефективна в'язкість η (прямий і зворотний хід) водних розчинів «гелеутворювач+Магнетофуд» з різною кількістю ХДМ, %: а – на агарі; б – на пектині (1 і 5 – контроль, 2 і 6 – 0,1; 3 і 7 – 0,15; 4 і 8 – 0,2)

Встановлено тиксотропні властивості гелеподібних систем з ХДМ. Зокрема, додавання ХДМ у водні розчини гелеутворювачів уповільнює процеси руйнування в 1,15...1,22 раза і прискорює процеси відновлення гелевої структури після припинення механічного впливу на 8,8..9,2%, підвищуючи її здатність до тиксотропії в 1,4...1,5 раза.

Це пов'язано зі поверхнево-активними властивостями ХДМ та її здатності до формування певної консистенції й стабілізації дисперсної системи, що перешкоджає її поділу [262, 264, 265, 268, 269, 354]. Таким чином, дослідження реологічних властивостей водних розчинів «гелеутворювач+Магнетофуд» з різними гелеутворювачами підтверджують гіпотезу коригування цих властивостей гелеподібних систем під впливом ХДМ.

Дослідження піноутворювальних властивостей в модельних системах «яєчний білок+Магнетофуд». Значна частка повітряної фази і, як наслідок, висока пористість збивних виробів досягається, як правило, збиванням яєчного

білка до стану стійкої піни. Якість кінцевого продукту в значній мірі визначається якістю білкової піни, тому питанню підвищення піноутворювальної здатності яєчного білка і поліпшення реологічних характеристик піни приділяється підвищена увага [525]. Доведено функціонально-технологічний ХДМ у харчових системах, а саме, структуроутворювальну і стабілізуювальну здатність; загущувальну дію та ін. [263, 341, 402, 523]. Крім того, поверхнева активність ХДМ може виявлятися в її впливі на процеси піноутворення. Тому доцільним було дослідження піноутворювальної здатності (ПЗ) (рис.4.30, а) за методом Лур'є [384] та піностійкості за осіданням стовпа піни в часі [384] на модельних системах «яєчний білок+Магнетофуд», які одержували додаванням до 10% водних розчинів сухого яєчного білка ХДМ у кількості 0,10%; 0,15%; 0,20% до маси сухого яєчного білка.

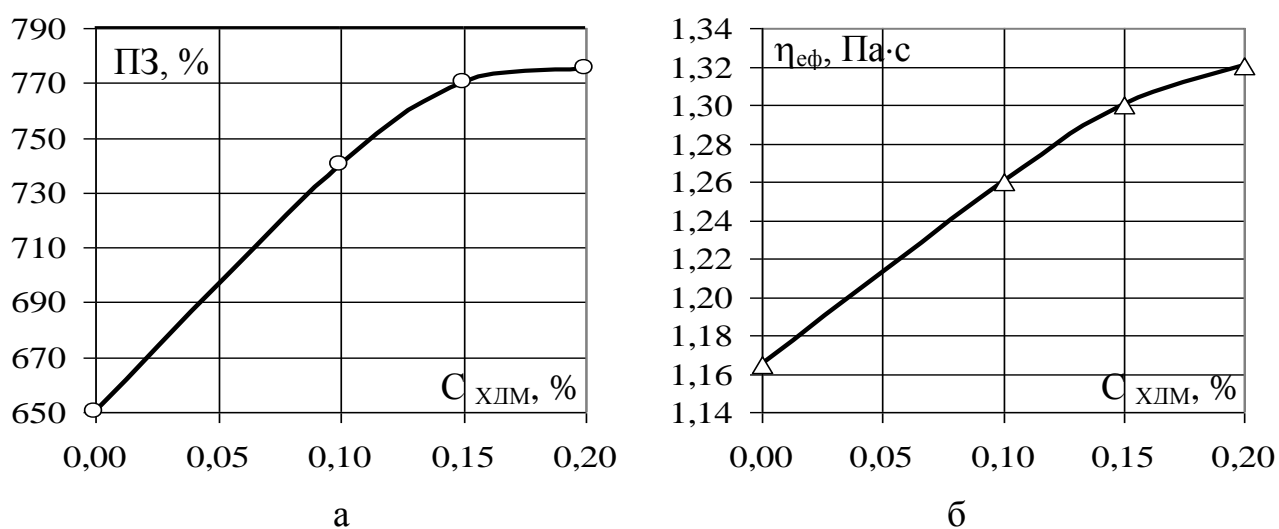


Рис. 4.30. Піноутворювальна здатність ПЗ (а) та ефективна в'язкість $\eta_{\text{еф}}$ (при швидкості зсуву $\dot{\gamma}=4,4 \text{ c}^{-1}$) (б) дослідних зразків пінної системи «яєчний білок+Магнетофуд»

Як видно з рис. 4.30, а, введення в яєчний білок ХДМ збільшує ПЗ дослідних зразків яєчного білка в (1,14...1,19) раза порівняно з контролем за рахунок зменшення поверхневого натягу білку і прискорювання коагуляції білкових молекул (під дією НЧМ), що призводить до збільшення в розчині білка об'ємної концентрації повітряної фази і зменшення розміру бульбашок

повітря. Встановлено, що піностійкість у всіх дослідних зразках «ячний білок+Магнетофуд» становить (99 ± 1) % за рахунок стабілізуючої дії НЧМ, яка пов'язана з наявністю на поверхні розділу фаз в адсорбційному шарі наночастинок з хімічно активною поверхнею, що збільшують силу зчеплення між молекулами білка. У результаті рухливість рідини падає, сповільнюється її стікання в плівці, запобігаючи тим самим коалесценцію бульбашок піни [263]; також, збільшується в'язкість рідини в плівках піни, що уповільнює їх руйнування і стабілізує піностійкість на рівні (99 ± 1) % [263]. Установлено підвищення в 1,10...1,15 рази ефективної в'язкості розчину яєчного білка (рис. 4.30, б) (за рахунок електростатичної та координаційної взаємодії НЧМ з макромолекулами яєчного білка і розгалуження головних ланцюгів його макромолекул) при внесенні ХДМ у кількості 0,05; 0,15%; 2% від маси сухого яєчного білка. Установлено зростання ефективної в'язкості у дослідних зразках пінних систем «ячний білок (10%)+гелеутворювач (1%)+Магнетофуд» в середньому в 1,4...1,7 рази за рахунок взаємодії полярних НЧМ з макромолекулами білків і полісахаридів, що призводить до формування додаткової просторової сітки [263, 475, 501] (рис.4.31).

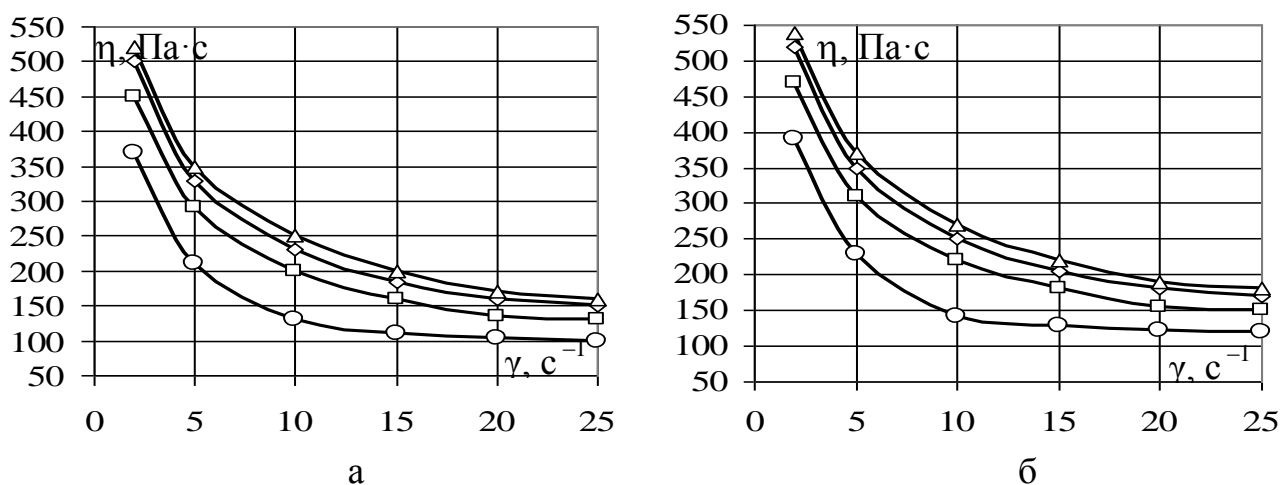


Рис. 4.31. Ефективна в'язкість η дослідних зразків пінних систем «ячний білок+гелеутворювач+Магнетофуд» з різною кількістю гелеутворювача та ХДМ, %: а – на агарі; б – на пектині (—○— – контроль, —□— – 0,1, —◇— – 0,15, —△— – 0,2)

Встановлено збільшення ПЗ у дослідних зразках пінних систем «ячний білок (10%)+гелеутворювач (1%)+Магнетофуд» в 1,2...1,4 рази за умови додавання ХДМ в межах 0,05...0,2% від маси сухого яєчного білка (піностійкість у цих дослідних зразках становить (99 ± 1) %), що пов'язано не

тільки з корегуванням поверхневої активності, але з впливом НЧМ на ефективну в'язкість білкових систем з агаром та пектином (рис. 4. 32).

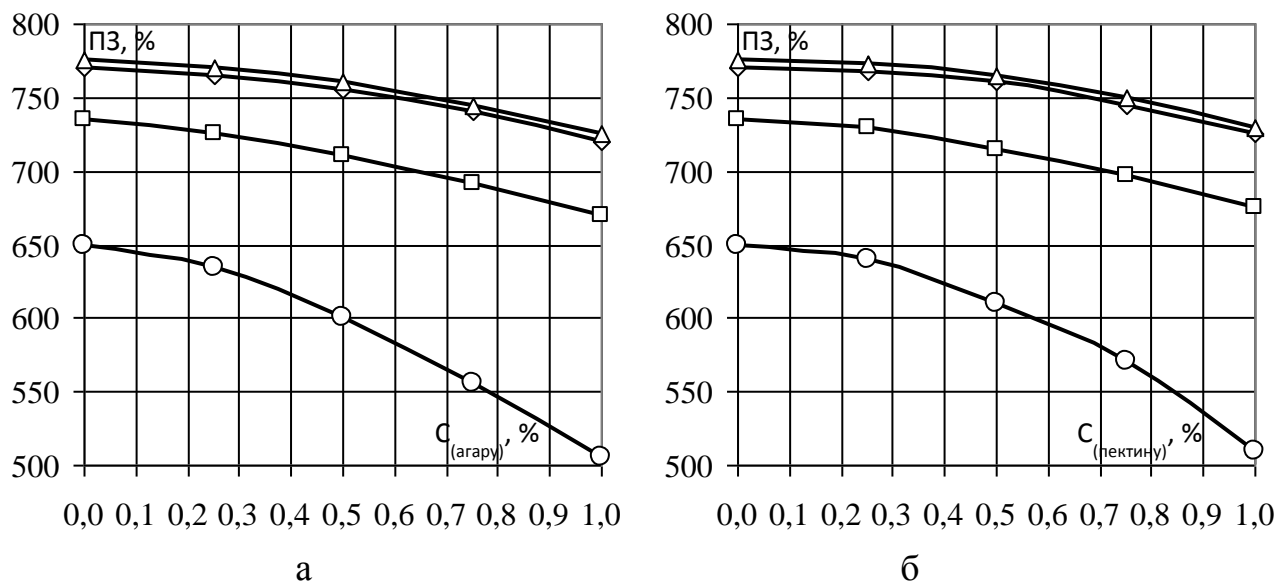


Рис. 4.32. Піноутворювальна здатність ПЗ дослідних зразків пінних систем «яєчний білок+гелеутворювач+Магнетофуд» з різною кількістю гелеутворювача та ХДМ, %: а – на агарі; б – на пектині (—○— – контроль, —□— – 0,1, —◇— – 0,15, —△— – 0,2)

При використанні ХДМ за рахунок амфотерності її наночастинок (наявності Fe^{2+} і Fe^{3+}) змінюється активна кислотність пінної системи «яєчний білок(10%)+Магнетофуд» в бік, близький до ізоелектричної точки білка, у якій проявляється максимальна піноутворювальна здатність білкових розчинів [263, 501, 523]. З урахуванням того, що кислотність середовища значно впливає на електростатичну взаємодію і властивості білкових молекул, далі досліджено вплив рН середовища на ПЗ яєчного білка в дослідних зразках пінних систем «яєчний білок (10%)+Магнетофуд» з різною кількістю ХДМ, % (зразок 1 – контроль; зразок 2 – 0,1; зразок 3 – 0,15; зразок 4 – 0,2). Картина залежності ПЗ і стабільності піни (СП) у дослідних зразках 1–4 від значень рН встановлювалася із застосуванням елементів статистичної обробки даних. Унаслідок цього отримано рівняння регресії (4.1) і (4.2), які адекватно описують взаємозв'язок між піноутворювальними властивостями і рН середовища при різній масовій частці ХДМ у модельній системі «яєчний білок(10%)+Магнетофуд»:

$$ПЗ=166,7778+406,6667x+57,0556y-0,306xy-1200x^2-6,0556y^2 \quad (4.1)$$

$$СП=64,3523+145,5146x+1,6189y+2,4864xy-517,6136x^2-0,1963y^2 \quad (4.2)$$

де x – рН; y – масова частка ХДМ, д. од.

З графічних зображень залежностей ПЗ (рис. 4.33, а) і СП (рис. 4.33, б) від значень рН середовища видно, що для 10% яєчного білка (зразок 1 – контроль) величини ПЗ і СП при значеннях рН від 2 до 7,5 змінювалися на $(22,6\pm 1)\%$ і на $(2,6\pm 0,5)\%$ відповідно, тоді як в дослідних зразках 2–4 (системи «яєчний білок(10%)+Магнетофуд» зі збільшенням масової частки ХДМ ці показники змінювалися в середньому на $(19,8\pm 1)\%$ і на $(1,6\pm 0,5)\%$ відповідно.

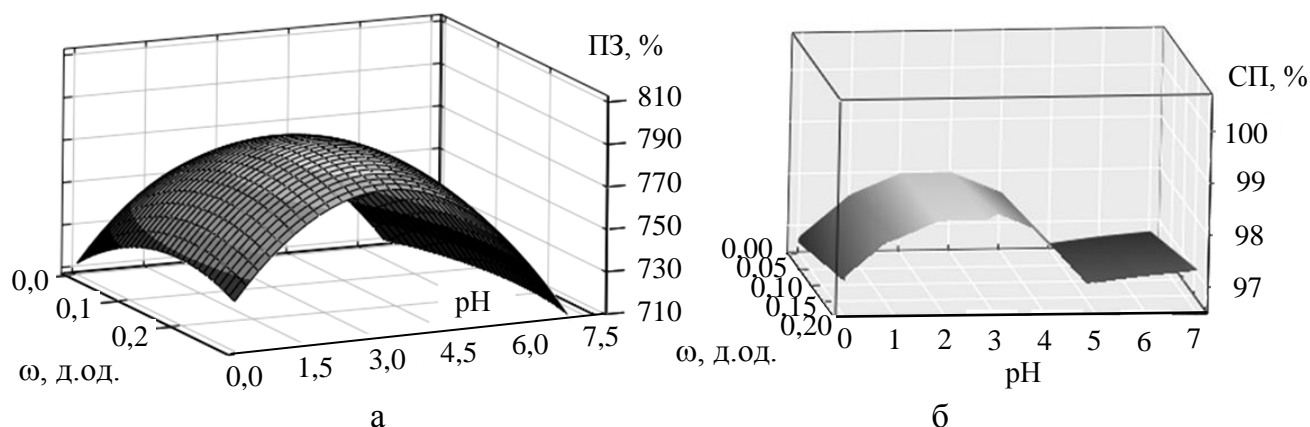


Рис. 4.33. Залежність піноутворювальних властивостей дослідних зразків пінної системи «яєчний білок(10%)+Магнетофуд» від рН середовища і масової частки ХДМ ω , д.од.: а – ПЗ; б – СП

Тобто при введенні ХДМ вплив рН на піноутворювальні властивості яєчного білка менш значний, що пов'язано зі стабілізуювальною дією цієї добавки. Установлено, що оптимальні значення для ПЗ і СП є такими: вміст ХДМ $\omega = (0,150\pm 0,001)$ д.од.; рН=4,8...5,0.

Проведені дослідження піноутворювальних властивостей (ПЗ, СП) модельних пінних систем «яєчний білок (10%)+Магнетофуд» і «яєчний білок (10%)+гелеутворювач (1%)+Магнетофуд» доводять здатність ХДМ до стабілізуювальної дії щодо пінних систем та коригування процесів піноутворення у технології харчової продукції з піноподібною структурою.

4.8. Вивчення ремісійних (відображених) характеристик ХДМ

ХДМ є пігментом мінерального походження, і їй притаманні значні технологічні переваги порівняно з більшістю натуральних барвників. ХДМ дає яскраві, легко відтворювані кольори, вона менш чутлива до різних впливів у ході технологічного процесу (нагрівання, дія високих температур, різних рН середовища, сполук різного походження та ін.) і умов зберігання. А завдяки нанорозмірам ХДМ, а отже специфічності та стабільності своїх властивостей, має переваги перед відомими до теперішнього часу мінеральними барвниками і пігментами, зокрема харчовим барвником Е 172, який має такий же хімічний склад, але іншу дисперсність [137, 459]. Ремісійні характеристики є об'єктивною оцінкою кольору добавки: колір буде визначатися співвідношенням катіонів феруму (Fe^{2+} і Fe^{3+}), тому що червоно-жовта складова кольору добавки зумовлена наявністю двовалентного феруму, що може взаємодіяти з киснем і світлом; а темно-коричнева – наявністю тривалентного феруму. Ремісійні характеристики зразків, що зберігалися протягом 12 місяців при температурі $-5...30^\circ\text{C}$ з $\varphi \leq (85 \pm 2)\%$, визначалися на спектрофотометрі

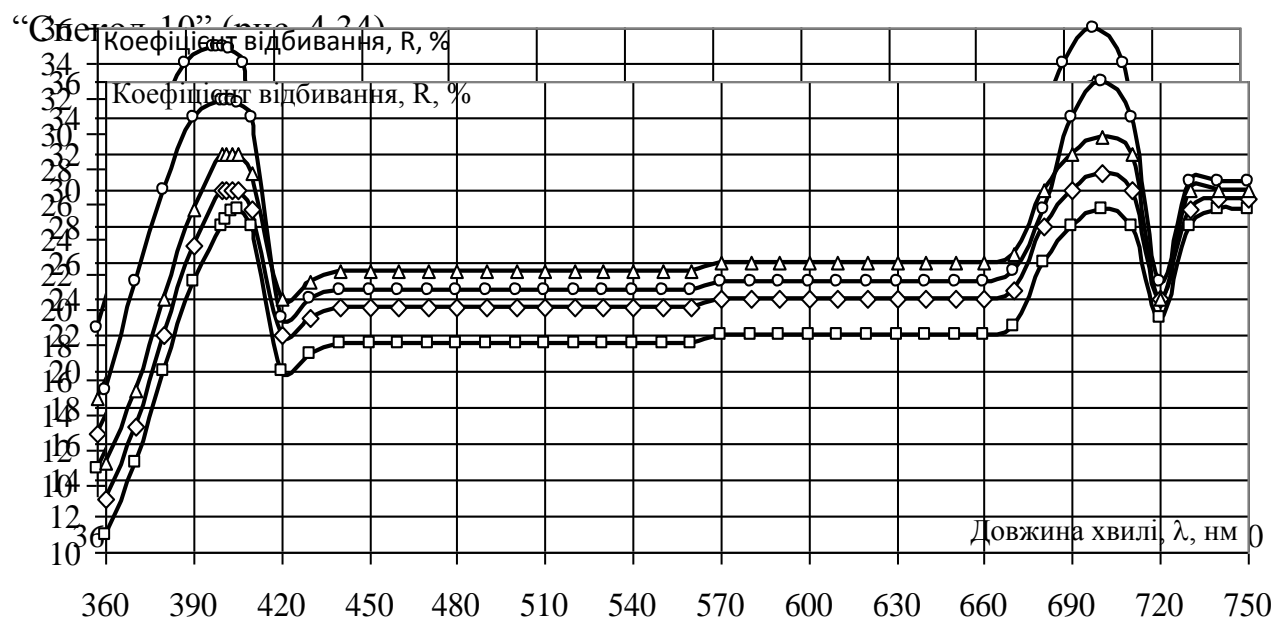


Рис. 4.34. Ремісійні характеристики ХДМ під час зберігання за температури $-5...30^\circ\text{C}$ та відносної вологості повітря $\varphi \leq (85 \pm 2)\%$

За спектрами відображення (рис. 4.34) визначені колірні характеристики ХДМ при зберіганні (табл. 4.5 і табл. 4.6). Видно, що в процесі зберігання для

всіх зразків спостерігається незначне зміщення колірнього тону в сторону темного забарвлення при дедалі більшій чистоті тону.

Останнє характеризує однорідність колірнього тону, який в межі прагнутиме до яскраво вираженого темно-коричневого забарвлення.

Таблиця 4.5

Кольорові параметри дослідних і контрольного зразків (колірний тон контролю 720 нм): джерело світла – В (денний, помірний)

Зразки	Координати кольору			Зміщення колірнього тону, нм	Чистота кольору
	X	Y	Z		
Контроль	21,4	28,5	18,64	0	0,34
2 місяці	19,32	25,34	13,64	+3	0,48
6 місяців	19,36	25,72	15,77	+4	0,42
12 місяців	21,21	28,4	15,12	+5	0,46

Таблиця 4.6

Кольорові параметри дослідних і контрольного зразків (колірний тон контролю 720 нм): джерело світла – С (денний, яскравий)

Зразки	Координати кольору			Зміщення колірнього тону, нм	Чистота кольору
	X	Y	Z		
Контроль	21,46	28,34	23,65	0	0,24
2 місяці	19,21	25,52	17,22	+4	0,36
6 місяців	19,48	26,11	20,25	+5	0,32
12 місяців	21,11	28,2	19,56	+6	0,34

Дані колірних характеристик корелюють із співвідношенням катіонів ферума: Fe^{2+} і Fe^{3+} (табл. 4.7).

Таблиця 4.7

Співвідношення катіонів ферума: Fe^{2+} і Fe^{3+} в ХДМ при зберіганні (12 місяців) в полімерній плівці порівняно з контролем

Дослідні зразки ХДМ	Вміст ферума у дослідних зразках ХДМ ω , %		
	$Fe_{заг}$ (Fe_3O_4)	Fe^{3+} (Fe_2O_3)	Fe^{2+} (FeO)
Контроль (без зберігання)	99,5 \pm 0,1	69,1 \pm 0,1	30,4 \pm 0,1
Зразок ХДМ (при зберіганні)	99,5 \pm 0,1	70,0 \pm 0,1	29,5 \pm 0,1

Як видно з табл. 4.7, при зберіганні протягом 12 місяців ХДМ в полімерній плівці валентні форми заліза змінюються незначно – всього на $(0,4 \pm 0,1)$ %, тобто зберігаються добре в полімерній плівці, що зумовлює збереження кольоровоформульовальної функції добавки.

Таким чином, підтверджено, що за умови реалізації трьох моделей функціонально-технологічних властивостей ХДМ: ВУЗ – «кластерно-петельно-ланцюгової» і «кластерно-капілярної», ЖУЗ – «двошарової координації» та здатності наночастинок ХДМ до «кластерофільності» і Пікерінг-стабілізації можна коригувати функціонально-технологічні властивості поліфазних систем, що є підґрунтям для розробки науково обґрунтованих технологій харчової продукції з покращеними показниками якості та подовженим терміном зберігання.

Висновки за розділом 4

1. Хімічну активність ХДМ було досліджено у модельних системах, що містять білки, жири, полісахариди, при різних значеннях рН. Установлено закономірності утворення комплексів «наночастинка-високомолекулярна сполука (білок, полісахарид, жир)», які відбуваються через електростатичну взаємодію та координаційний (донорно-акцепторний) зв'язок. Аналізом цих взаємодій за допомогою «клатратних» моделей виявлено потенціал НЧМ для утворення цілого ряду комплексів за типами: «кластер», «клатрат», «кавітат», «комплекс-сендвіч»; ці моделі дозволили спрогнозувати забезпечення таких властивостей наночастинок, як амфіфільність і «кластерофільність», а введення НЧМ до складу харчової продукції зі поліфазною структурою – технологічну стійкість гетерогенної структури шляхом Пікерінг або стеричної стабілізації.

Встановлено, що взаємодія НЧМ з іоногенними групами білків здійснюється через іонний зв'язок: негативно заряджених гідроксильних OH^- -груп гідроксильованих НЧМ з позитивно зарядженими NH_3^+ -групами бічних радикалів амінокислотних залишків та негативно заряджених COO^- -груп

амінокислотних залишків з позитивно зарядженими катіонами H^+ протонуваних наночастинок Fe_3O_4 . Встановлено, що іонно-дипольна взаємодія протонуваних НЧМ з карбогідроксилуваними залишками амінокислот і диполь-дипольна взаємодія полярних НЧМ з диполями пептидного зв'язку є координаційними та призводять до утворення електростатичних внутрішньо- і міжмолекулярних комплексів – «клатратів» і «кавітатів»; сольватовані наночастилки ХДМ сприяють підсиленню водневих зв'язків, що у сукупності коригує водоутримувальну властивість білків та полісахаридів харчових систем.

2. Доведено, що здатність наночастинок ХДМ до поляризації, електростатичної координації і прояв цих властивостей в системах, які містять білки та полісахариди (вуглеводи), зумовлює водоутримувальну здатність ХДМ, закономірності якої описані фізико-хімічною моделлю «кластерно-петельно-ланцюгового» типу.

3. Доведено, що при гідратації вуглеводів у присутності НЧМ утворюється система водневих, гідрофобних, електростатичних, координаційних зв'язків, що сприяє більш стійкій структурі вуглеводних полімерів. Механізм цього утворення описаний «кластерно-капілярною» моделлю, суть якої полягає у тому, що наночастилки адсорбуються на поверхні зерен або в мікрокапілярах твердих частинок, наприклад крохмалю, що сприяє підсиленню електростатичної взаємодії з диполями H_2O , тим самим НЧМ сприяють утворенню таких колоїдних систем, як гідрофільні золі-гелі (крохмальний клейстер).

Встановлено, що НЧМ впливають на водоутримувальну здатність (ВУЗ) залежно від хімічного складу харчової системи, рН середовища. Так, на прикладі модельних систем «житньо-пшеничне борошно+Магнетофуд» і «крохмаль+Магнетофуд» у нейтральному середовищі зі полярних НЧМ утворюються сольватовані наночастилки, які, внаслідок взаємодії з іоногенними групами білково-вуглеводного комплексу борошна (або іоногенними групами макромолекул полісахаридів крохмалю) та диполями води, формують сольватоконплекси, що приводять до збільшення ВУЗ

дисперсної системи: в 1,15...1,3 рази для крохмалю та в 1,15...1,27 рази для борошна (порівняно з контролем).

4. Важливою складовою харчових продуктів є жири. Експериментально доведена антиоксидантна властивість ХДМ при введенні її в харчові системи. Визначено зменшення пероксидного та кислотного чисел за рахунок гальмування процесів окиснення під дією проміжних комплексів НЧМ з оксисеном пероксидних радикалів і гідрогенпероксидів та уповільнення процесів гідролізу жирів через механізм сорбції вільних жирних кислот на наночастинках ХДМ. Це зумовлено більш низькою швидкістю реакцій окиснення, полімеризації, циклізації.

5. Механізми хемосорбції вищих жирних кислот та жирів досліджувалися методом ІЧ-Фур'є спектроскопії, яким встановлено поява двох нових смуг поглинання, характерних для валентних асиметричних (ν_{as}) і валентних симетричних (ν_s) коливань карбоксилатної групи, та зникнення смуги валентних коливань $C=O$ -зв'язку, саме це є доведенням утворення на поверхні НЧМ першого мономолекулярного адсорбційного шару жирів. А формування другого димолекулярного адсорбційного шару підтверджується зміщенням ν_{as} , ν_s і деформаційних (δ) коливань $H-C-$ і $HC=CH$ -груп в низькочастотну область. Це і є обґрунтуванням моделі «Двошарової координації» – механізму жирутримувальної здатності наночастинок ХДМ.

6. Встановлено ефективність коригування стійкості харчових емульсій у разі введення ХДМ. Дискретне варіювання масової частки ХДМ від 0,10% до 0,20% збільшує кінетичну й агрегативну стійкість у прямих емульсіях на основі олії в середньому в 1,2 рази. Досліджено стійкість емульсій мікроскопічними методами та визначено їх структуру і дисперсність. Вивчено вплив технологічних чинників для утворення емульсій «вода+олія+Магнетофуд». Установлено, що кінетична та агрегативна стійкість емульсійних систем «вода+олія+Магнетофуд» зменшується: після термообробки лише на 4,5...5,5%; після кріообробки на 6,5...7,5% за рахунок стабілізуючої дії ХДМ та її термостабільності (збереження поверхневої активності в широкому

температурному інтервалі). Доведено, що основними механізмами при цьому є Пікерінг-стабілізація, підсилена амфіфільністю до полярних і неполярних середовищ поверхні НЧМ, яка характеризується крайовими кутами змочування: вода $\Theta = (45 \pm 1)^\circ$, олія $\Theta = (60 \pm 1)^\circ$. Встановлено раціональний вміст ХДМ для емульсійних систем, який дорівнює 0,15% від маси колоїдного розчину.

7. Загущувальні властивості ХДМ доведені збільшенням в'язкості водних розчинів «гелеутворювач+Магнетофуд» з різною кількістю ХДМ (0,10%; 0,15%; 0,20% від кількості колоїдного розчину) у середньому в 1,25 раза порівняно з контролем. Встановлено тиксотропні властивості гелеподібних систем з ХДМ. Зокрема, при додаванні ХДМ (0,10%; 0,15%; 0,20% від кількості колоїдного розчину) в розчині гелеутворювача (пектину або агару) збільшується коефіцієнт тиксотропії $K_{(\text{тикс.})}$ в середньому в 1,4...1,5 раза.

8. Поверхнева активність ХДМ доведена в її впливі на процеси піноутворення. Установлено підвищення в 1,10...1,15 раза ефективної в'язкості розчину яєчного білка та зростання його піноутворювальної здатності в 1,19...1,48 раза за умови додавання ХДМ в межах 0,05...0,2% від маси сухого яєчного білка (при цьому піностійкість у всіх дослідних зразках становить $(99 \pm 1)\%$), що пов'язано не тільки з корегуванням поверхневої активності, але і впливом НЧМ на ефективну в'язкість білкових систем з агаром та пектином. За раціональний вміст ХДМ для пінних систем «яєчний білок+Магнетофуд» і яєчний білок+гелеутворювач (агар або пектин)+Магнетофуд» обрано 0,15% від маси сухого яєчного білка.

9. Вивченням ремісійних (відображених) характеристик встановлено кольороформульовальну функцію добавки, якій властиве яскраво виражене темно-коричневе забарвлення, що стабільно в умовах зберігання: протягом 12 місяців у полімерній плівці за температури $t = -5 \dots 30^\circ\text{C}$ та відносної вологості повітря $\varphi \leq (85 \pm 2)\%$.

РОЗДІЛ 5

ТЕХНОЛОГІЇ ХЛІБОБУЛОЧНОЇ, КОНДИТЕРСЬКОЇ, КУЛІНАРНОЇ, М'ЯСНОЇ ПРОДУКЦІЇ З ПОЛІФАЗНОЮ СТРУКТУРОЮ З ВИКОРИСТАННЯМ ХАРЧОВОЇ ДОБАВКИ «МАГНЕТОФУД»

У цьому розділі обґрунтовано доцільність використання та встановлено особливості реалізації сформованого функціонально-технологічного потенціалу харчової добавки «Магнетофуд» (ХДМ) щодо піно- і гелеутворювальної, емульгувальної, стабілізувальної, водо- і жирутримувальної здатності; стійкості пін та емульсій, загущувальних, тиксотропних та антиоксидантних властивостей у харчовій продукції з поліфазною структурою (житньо-пшеничного хліба, пряників заварних, вівсяного печива, десерту із сиру кисломолочного, м'ясних посічених виробів, формового желейного мармеладу на пектині й агарі, біло-рожевого зефіру на пектині й агарі, ягідно-плодових збитих десертів).

5.1. Наукове обґрунтування та експериментальне підтвердження раціонального способу введення ХДМ у харчову продукцію з поліфазною структурою

Як доведено у розділах 3 і 4, виходячи зі здатності наночастинок ХДМ створювати достатньо стійкі поліфазні дисперсні системи (зокрема, емульсії, суспензії) через «ефект Пікерінга»; високий ξ -потенціал 34...44 мВ; структурно-механічний чинник стійкості, пов'язаний з комплексоутворювальною та електростатичною дією наночастинок «Магнетофуд» (НЧМ), що приводить до просторового структурування й стабілізації поліфазних дисперсних систем (ПДС), а також з метою рівномірного розподілу й функціонування НЧМ за об'ємом ПДС наночастинок ХДМ залучали до технології виробництва харчової продукції у вигляді жирової (ЖС) та водної суспензії (ВС). Встановлено

раціональний спосіб введення ХДМ у вигляді ЖС у харчові продукти емульсійного, суспензійно-емульсійного і піноподібного типу в технологіях житньо-пшеничного хліба, заварних пряників, вівсяного печива, м'ясних посічених виробів та десертів із сиру кисломолочного.

Жирову суспензію добавки отримували пептизацією порошку ХДМ в жир (або олію) [264, 267, 355, 434, 438, 443, 445, 448, 474]. Визначено раціональні параметри отримання ЖС, до складу якої входить соняшникова олія та харчова добавка «Магнетофуд» (ХДМ) у співвідношенні олія:ХДМ=50 мас. %:50 мас. %: ретельне перемішування суміші ($n=2,0...2,2 \text{ c}^{-1}$) при $t=45...50^{\circ}\text{C}$ протягом $\tau=(3...4)\times 60 \text{ c}$. Отриману суспензію вводили у кількості 0,3 кг на 100 кг сировини, що дорівнює 0, 15% ХДМ від маси сировини.

Відзначено, що отримана ЖС має достатню седиментаційну та агрегативну стійкість, характеризується певною ємністю НЧМ (до 50 масових одиниць), що зумовлено величиною їх електрокінетичного ξ -потенціалу 34...44 мВ (така суспензія є технологічною, стійкою дисперсією). Саме цей факт є важливою технологічною операцією для залучення НЧМ у технологічний процес виробництва харчової продукції. Як відомо із закономірностей фізикоїдної хімії, утворення дисперсій у полярних розчинниках – більш складний процес, який характеризується певною насиченістю або ємністю дисперсійного середовища (зокрема, H_2O) щодо дисперсної фази (масового вмісту НЧМ).

Так, у 3 розділі експериментально встановлено, що використання у водних суспензіях масової частки НЧМ у кількості 3...5% сприяє утворенню стійких суспензій з високим ξ -потенціалом 33,8...44,2 мВ. Також доведено ефективність технологічного прийому отримання стійких водних суспензій (ВС) НЧМ з додаванням таких структуроутворювачів, як яечний білок, пектин, агар, крохмаль. Такий механізм підвищення стійкості суспензій пояснюється, по-перше, дією кулонівських сил відштовхування однаково заряджених іонів, їх дезагрегуванням та зниженням величини сили тертя між ними; по-друге, колоїдністю частинок ХДМ, їх високим ξ -потенціалом, хемосорбцією молекул

дисперсійного середовища на поверхні частинок дисперсної фази, з подальшим просторовим структуруванням частинок ХДМ [262, 402, 354, 526–529].

Доведено, що раціональним способом введення ХДМ у технології виробів піно- та гелеподібної структури, зокрема мармеладу, зефіру, збитих ягідно-фруктових десертів, є водні суспензії (ВС) ХДМ з відповідними гелеутворювачами, такими як желатин, агар, пектин [402, 526, 527, 529]. При цьому технологія отримання водної суспензії ХДМ (у вигляді технологічної операції) технологічно дозволяє не ускладнювати процес виробництва; коригувати гелеутворювач та сприяти рівномірному розподілу НЧМ й функціонуванню за об'ємом пінної/гелеподібної маси. Отже, ХДМ вводиться у вигляді ВС на етапі набрякання та розчинення гелеутворювача у кількості 30,0 кг на 1000 кг сировини (раціональний вміст ХДМ дорівнює 0,15% від маси рецептурної суміші).

Визначено раціональні параметри утворення ВС: ГМ=1:18:1; $t_1=15...18^{\circ}\text{C}$; $n_1=2,0...2,2\text{ c}^{-1}$; $\tau_1=(30...40)\times 60\text{ c}$ для желатину, $\tau_1=(25...30)\times 60\text{ c}$ для агару, $\tau_1=(35...40)\times 60\text{ c}$ для пектину; $t_2=60...65^{\circ}\text{C}$ для желатину, $t_2=95...100^{\circ}\text{C}$ для агару, $t_2=85...90^{\circ}\text{C}$ для пектину; $n_2=2,0...2,2\text{ c}^{-1}$; $\tau_2=(2...3)\times 60\text{ c}$.

Експериментально встановлено, що водні суспензії ХДМ мають достатню седиментаційну стійкість, певну ємність НЧМ (до 5 масових одиниць), що зумовлено величиною ξ -потенціалу=34...44 мВ (розділ 3) та [262, 354] Такі суспензії є технологічними, стійкими дисперсіями, тому залучались до технологічного процесу.

5.2. Технологія хлібобулочних виробів із суміші житнього та пшеничного борошна з використанням харчової добавки «Магнетофуд»

Як доведено у розділі 4 та Додатку А. 3, введення ХДМ у кількості 0,10%; 0,15%; 0,20% від маси борошна збільшує: набухаємість, водопоглинальну, водо- і жиротримувальну, жирозв'язувальну, жироемульгувальну здатність житньо-

пшеничного борошна (60:40) та підвищує в'язкість його водних суспензій [500, 524]. Встановлено раціональна масова частка ХДМ, яка дорівнює 0,15% від маси борошна [264, 392, 465, 474, 507, 530]. Це є підґрунтям для введення цієї добавки в хлібобулочні [465, 474, 476, 496, 507] та борошняні кондитерські вироби [502, 504, 531].

Для рівномірного розподілу й функціонування наночастинок «Магнетофуд» (НЧМ) за об'ємом тістової маси ХДМ вводили у вигляді жирової суспензії (ЖС) при замішуванні тіста в технологічному процесі житньо-пшеничного хліба [465, 474, 496] та заварних пряників [502] (або при розтиранні масла в технології вівсяного печива [503, 531]) у кількості 0,3 кг на 100 кг борошна (або рецептурної суміші для пряників і вівсяного печива), що дорівнює 0,15% ХДМ від маси борошна (або рецептурної суміші для пряників і вівсяного печива).

В табл. 5.1 наведено рецептури житньо-пшеничного хліба з введенням 0,15% ХДМ (у вигляді ЖС) до маси борошна (дослід) [465, 474, 496, 507] та контролю (хліб «Дарницький») [532].

Таблиця 5.1

**Рецептури житньо-пшеничного хліба «Дарницький» (контроль)
та хліба житньо-пшеничного з внесенням 0,15% ХДМ**

Найменування сировини	Витрати сировини, в кг	
	Хліб житньо-пшеничний	
	«Дарницький» Зразок 1 – контроль	з 0,15% ХД М Зразок 2 – дослід
Борошно пшеничне	40,0	40,0
Борошно житнє обдирне	60,0	60,0
Дріжджі хлібопекарські пресовані	0,5	0,5
Сіль	1,4	1,4
Жирова суспензія ХДМ	–	0,3
Всього	101,9	102,2
Вихід хліба, %	138,4	144,1

Для вивчення й удосконалення основних процесів в технології хліба була обрана кібернетична (параметрична) модель «чорний ящик», наведена у Додатку А 4. В

У рамках параметричної моделі розглянуто вплив ХДМ на властивості основної сировини хлібопекарського виробництва – кількість і якість клейковини житньо-пшеничного борошна (табл. 5.2).

Таблиця 5.2

**Показники якості зразка житньо-пшеничної клейковини
з 0,15% ХДМ порівняно з контролем**

Показник житньо-пшеничної клейковини	Час відлежування тіста, τ·60с	Дослідні зразки житньо-пшеничного тіста	
		Зразок 1 – контроль	Зразок 2 – з 0,15% ХДМ
Маса сирієї клейковини, г	20	27,9 ± 1,4	28,1 ± 1,4
	180	26,2 ± 1,3	26,5 ± 1,3
Гідратаційна здатність, %	20	204 ± 9,0	220 ± 9,5
	180	224 ± 9,5	240 ± 9,8
Пружність на приладі ІДК, ум. од.	20	49,0 ± 2,5	60,0 ± 2,9
	180	58,0 ± 2,9	73,0 ± 3,6
Розтяжність, см	20	12,0 ± 0,6	14,6 ± 0,7
	180	14,5 ± 0,7	15,5 ± 0,7

Як видно з табл. 5.2 введення ХДМ у кількості 0,15% від маси борошна в житньо-пшеничне тісто сприяє: збільшенню гідратаційної здатності на 7,1...7,8%, пружності – на 22,4...25,9%; розтяжності – на 7,8...13,0% порівняно з контролем. Це пов'язано зі «кластерофільністю» НЧМ.

Виходячи з хімічного потенціалу, амфотерності, сорбційної активності, спорідненості до білків ферментів, механізмів водо- і жирутримувальної здатності, наявних при моделюванні тістових систем та доведених у розділі 4, наночастинки «Магнетофуд» (НЧМ) можуть впливати на технологічні показники: кислотність, тривалість бродіння і вистоювання тісту та його структурно-механічні властивості.

Важливо відзначити, що зазвичай тривалий час бродіння і підвищена кислотність сприяють розжиженню тіста. У табл. 5.3 наведено технологічні показники дослідних зразків житньо-пшеничного тіста, звідки видно, що вологість і кислотність тіста при внесенні 0,15% ХДМ відповідають вимогам

нормативної документації. Покращуються газоутримувальна здатність і розпушування тіста.

Таблиця 5.3

Технологічні показники дослідного зразка житньо-пшеничного тіста з 0,15% ХДМ порівняно з контролем

Показник житньо-пшеничного тіста	Дослідні зразки житньо-пшеничного тіста	
	Зразок 1 – контроль	Зразок 2 – з 0,15% ХДМ
Вологість тіста, %	47,0±2,4	48,4±2,4
Кислотність тіста поч., °	6,9±0,3	6,1±0,3
Кислотність тіста кінц., °	7,8±0,4	7,1±0,3
Тривалість бродіння тіста, τ·60 с	55±5,0	45±5,0
Тривалість вистоювання тіста, τ·60 с	60±3,0	45±2,0
Граничне напруження зсуву, Па	445,0±22,0	494,0±23,7
Адгезійна міцність (сталь), кПа	2,5±0,2	1,9±0,1
Пластична в'язкість, кПа·с (при $\gamma=0,02 \text{ c}^{-1}$)	7,0±0,3	9,2±0,4

При цьому скорочується час бродіння тістових мас на $(10\pm4,0)\cdot60$ с та вистоювання тістових напівфабрикатів на $(15\pm2,0)\cdot60$ с порівняно з контролем за рахунок здатності НЧМ інтенсифікувати біохімічні процеси. Цей ефект особливо важливий в умовах міні-виробництв і підприємств ресторанного господарства.

Крім того, введення НЧМ у житньо-пшеничне тісто порівняно з контролем збільшує: граничне напруження зсуву в 1,12 раза; пластичну в'язкість в 1,3 раза (через здатність добавки до утворення сольвато- і ліпідокомплексів та більш міцному утриманню вологи і жиру в структурі продукту); зменшує адгезійну міцність (до сталі) в 1,3 раза (через зниження вмісту вільної вологи в тісті і швидкості дифузії молекул в мікропори контактувальної поверхні за рахунок підвищення водоутримувальної здатності тіста під дією НЧМ). Також вплив ХДМ на структурно-механічні властивості при розтоюванні тістових заготовок дозволяє розширити асортимент геометричних форм і об'ємів готових виробів, які є більш стійкими.

Оцінку якості зразків житньо-пшеничного хліба з 0,15% ХДМ та хліба «Дарницький» (контроль) проводили за загальноприйнятими органолептичними (рис. 5.1) та фізико-хімічними (табл. 5. 4) показниками. Для оцінки органолептичних показників хліба була складена шкала з урахуванням коефіцієнтів вагомості та бальної характеристикою виробів, що наведені у Додатку А.5. Органолептичні показники зразків хліба оцінені дегустаційними комісіями кафедри технічного та тилового забезпечення Національної академії Національної гвардії України (Додаток К. 1) та ФО-П «Ведерников» (Додаток К.11).



Рис. 5.1. Органолептичні показники зразків хліба «Дарницький» (контроль) та житньо-пшеничного хліба з 0,15% ХДМ

Як видно з рис. 5.1, житньо-пшеничний хліб з 0,15% ХДМ має кращі органолептичні показники порівняно з контролем – хлібом «Дарницький».

Таблиця 5.4

Фізико-хімічні та технологічні показники зразків житньо-пшеничного хліба з 0,15% ХДМ та хліба «Дарницький» (контроль)

Показник житньо-пшеничного хліба	Зразки житньо-пшеничного хліба	
	«Дарницький» – контроль (зразок 1)	Зразок 2 – з 0,15% ХДМ
Вологість хліба, %	47,5±2,4	48,0±2,4
Кислотність хліба, °	7,5±0,4	7,2±0,3
Питомий об'єм хліба, см ³ /г	1,8 ±0,1	2,2 ±0,1
Пористість хліба, %	58,0±2,9	75,4±4,0
Втрати при термообробці, %	9,8±0,4	3,7 ±0,1
Вихід хліба, %	138,4±2,1	144,1±2,5

Як видно з табл. 5.4, вологість і кислотність хліба з використанням 0,15% ХДМ відповідають вимогам нормативної документації. Але в хлібі з ХДМ збільшується: питомий об'єм в 1,18...1,22 рази, пористість м'якушки в 1,28...1,32 рази (через інтенсифікацію біохімічних процесів), вихід на 5...6%; зменшуються втрати при термообробці на 5...6% порівняно з хлібом «Дарницький» (за рахунок стабілізуючої та вологоутримувальної здатності НЧМ).

За результатами досліджень розроблено технологічну схему виготовлення хліба житньо-пшеничного «Харківський родничок» з додаванням ХДМ (Додаток А.8 та рис. 5.2) [253, 454] Відмінною особливістю нової технології є введення ХДМ у вигляді ЖС при замішуванні тіста [465, 474, 507 та патенти – Додатки Б.12, Б.22]. Обґрунтовані наступні раціональні технологічні параметри: при замішуванні тіста порцію закваски змішують із дріжджовою суспензією, цукрово-сольовим розчином і водою. Потім вносять пшеничне борошно та ЖС ХДМ

Заміс здійснюють протягом (12...15)×60 с. Тісто дозріває (40...50)×60 с при температурі (25...28) °С. Кислотність дозрілого тіста становить (7...8) град. Неймана. На наступному етапі тісто розділяють на шматки певної маси, округлюють, укладають в змащені олією форми і направляють в шафу для вистоювання протягом 45×60 с при температурі (30–32) °С і відносній вологості повітря (75–80) %.

Випікання тістових заготовок проводиться в печі за 4 температурними зонами протягом 34×60 с: (230–240) °С – 7×60 с, (220–230) °С – 7×60 с, (210–220) °С – 13×60 с, (200–210) °С – 9×60 с.

Охолодження і зберігання хліба після випікання проводиться в умовах хлібосховища при відносній вологості повітря (70–75) % [496, 465, 476].

Якість хліба «Харківський родничок» оцінювали за показниками мікробіологічної безпечності безпосередньо після виготовлення і в процесі регламентованих термінів зберігання; а також за фізико-хімічними показниками і структурно-механічними властивостями хліба в процесі зберігання.

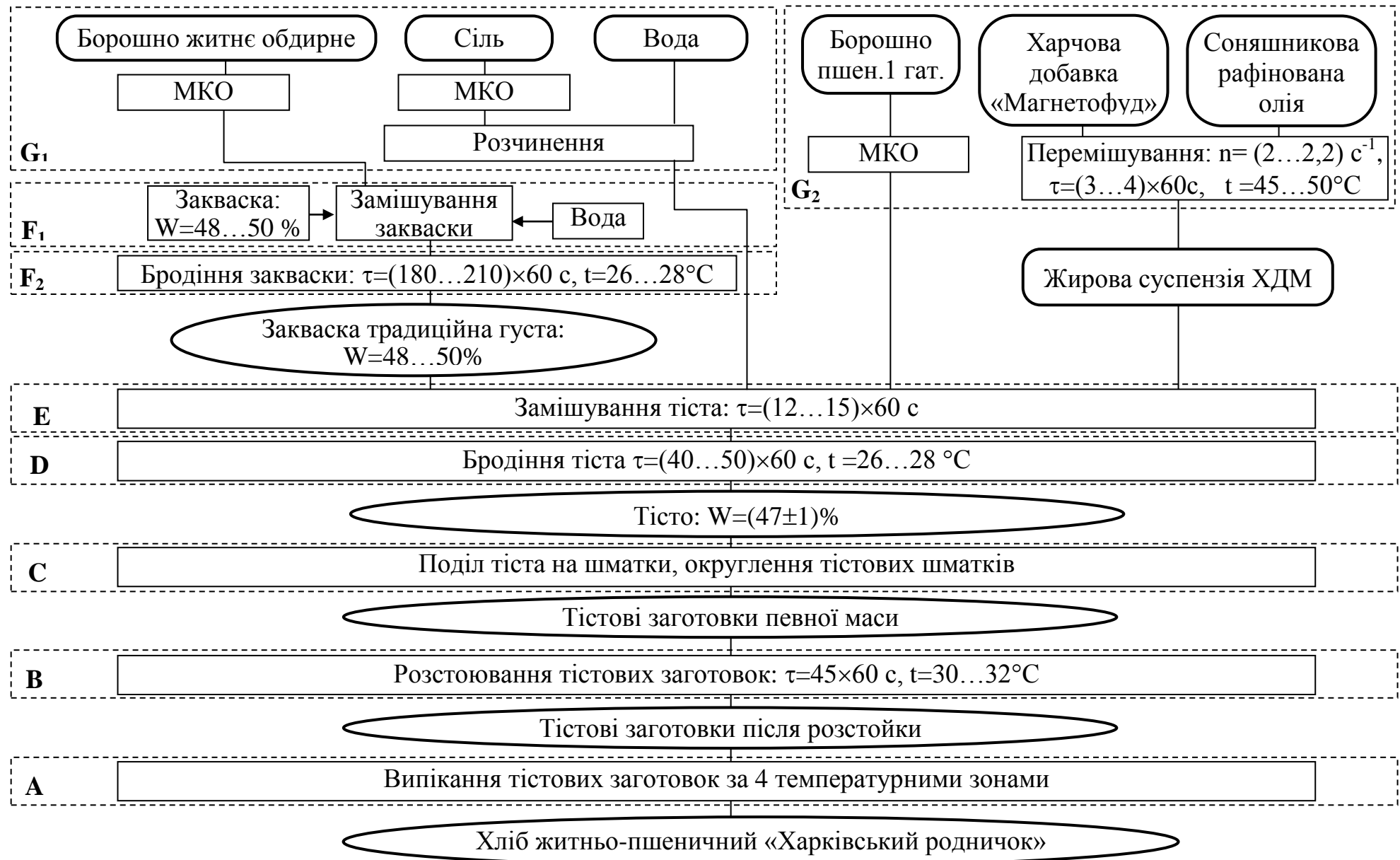


Рис. 5.2. Технологічна схема виробництва хліба житньо-пшеничного «Харківський родничок»: А, В, С, D, E, F_1 , F_2 , G_1 , G_2 – підсистеми технологічної схеми виробництва хліба

У рамках підсистеми А «Зберігання готових виробів» (Додатки А. 4, А.8) для визначення якості хліба «Харківський родничок» були вивчені такі показники: здатність виробів до черствіння за показниками формостійкості, питомого об'єму, стискуваності, усадки, еластичності, пористості, набухаємості, кришливості м'якушки, а також сорбційні характеристики.

На рис. 5.3 наведені дослідження усадки та еластичності зразків хліба житньо-пшеничного: «Харківський родничок» та «Дарницький» (контроль) в процесі зберігання.

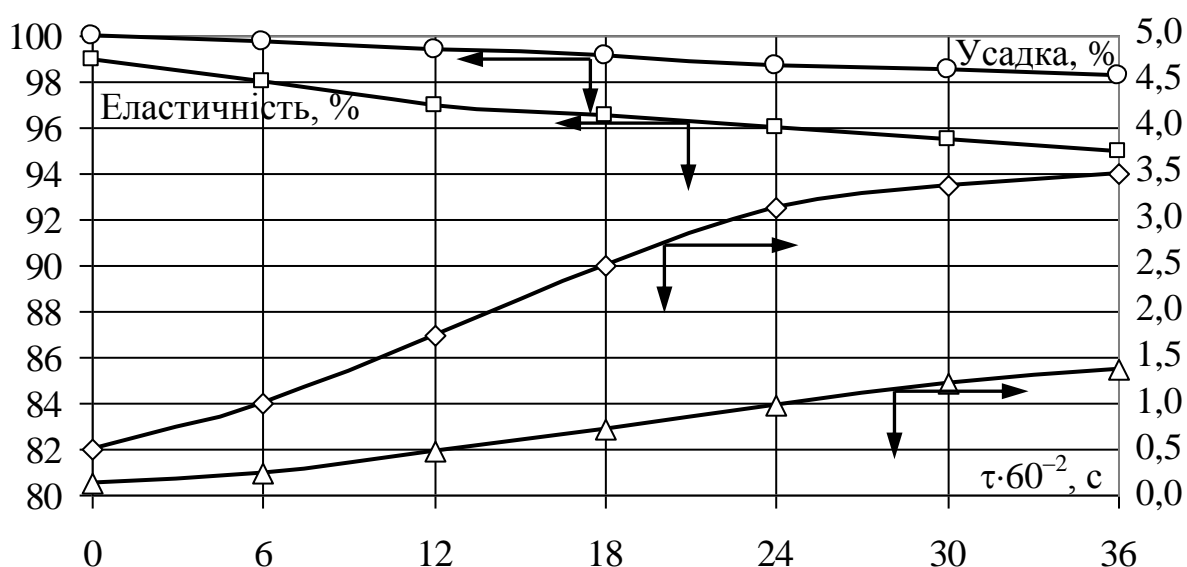


Рис. 5.3. Еластичність та усадка зразків житньо-пшеничного хліба: «Харківський родничок» та «Дарницький» в процесі зберігання: \circ – хліб «Харківський родничок», \square – хліб «Дарницький» – контроль, \triangle – хліб «Харківський родничок», \diamond – хліб «Дарницький» – контроль

Як видно з рис. 5.3, у першу добу після виготовлення хліб майже не черствіє; через 24 год. усадка становить: для контролю $(3,3 \pm 0,1)\%$, для хліба «Харківський родничок» $(1,2 \pm 0,05)\%$, крім того усадка практично зберігається протягом перших 36 год., на відміну від контролю, де вона зростає в $(2,2 \pm 0,1)$ раза. При збільшенні терміну зберігання еластичність зразків хліба знижується: через 36 год. для контролю на $(4,5 \pm 0,2)\%$, для хліба «Харківський родничок» лише на $(1,2 \pm 0,05)\%$, тобто значно повільніше. Це пов'язано з водо- і жирутримувальною здатністю ХДМ.

На рис. 5.4 наведені дослідження формостійкості, пористості та питомого об'єму зразків хліба житньо-пшеничного «Харківський родничок» та «Дарницький» (контроль) в процесі зберігання.

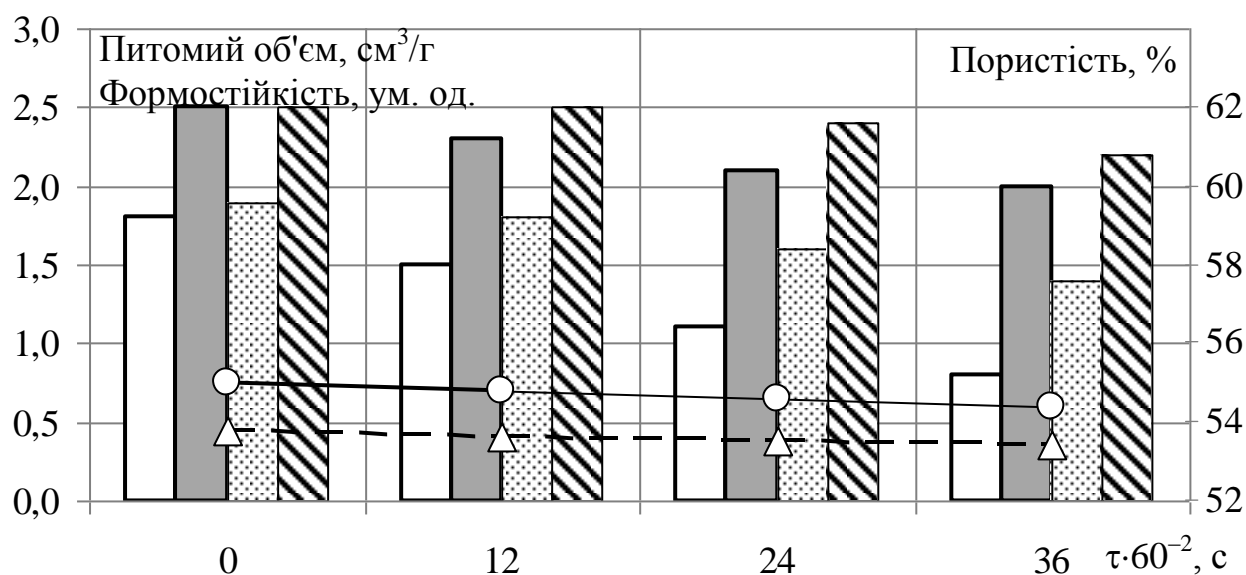


Рис. 5.4. Питомий об'єм, формостійкість та пористість зразків житньо-пшеничного хліба «Харківський родничок» та «Дарницький» в процесі зберігання (□ – питомий об'єм хлібу «Дарницький», ■ – питомий об'єм хлібу «Харківський родничок», ▨ – пористість хлібу «Дарницький», ▩ – пористість хлібу «Харківський родничок», —△— – формостійкість хлібу «Дарницький», —○— – формостійкість хлібу «Харківський родничок»)

З даних рис. 5.4 видно, що зміни пористості житньо-пшеничного хліба «Харківський родничок» відповідають тенденціям зміни питомого об'єму та формостійкості. Уведення ХДМ уповільнює зменшення цих показників протягом регламентованого терміну зберігання: пористість, формостійкість та питомий об'єм хліба «Харківський родничок» порівняно з контролем збільшується на 4,3...4,7%, в 1,6...1,7 раза та 1,8...2,4 раза відповідно (за рахунок здатності НЧМ до координаційного комплексоутворення, кластеризації та стеричної стабілізації харчової системи).

Для більш глибокого вивчення процесу черствіння житньо-пшеничного хліба були визначені показники набухання і кришливості м'якушки (табл.5.5), звідки видно, що здатність до черствіння хліба «Харківський родничок» з

додаванням ХДМ значно менша, ніж у хліба «Дарницький», що традиційно випускається підприємствами галузі.

Таблиця 5.5

Показники якості зразків хліба житньо-пшеничного (36 год зберігання)

Показник	Зразки житньо-пшеничного хліба	
	«Дарницький» (контроль)	«Харківський родничок» з 0,15% ХДМ
Стискуваність, од. пенетрометра	$29,0 \pm 1,4$	$36,0 \pm 1,8$
Набухаємість м'якушки, %	$249,0 \pm 12,0$	$305,0 \pm 12,0$
Кришливість м'якушки, %	$16,9 \pm 0,8$	$11,9 \pm 0,6$

Вивчено сорбційні характеристики нового виду хліба протягом регламентованих термінів зберігання, які дозволяють встановити умови зберігання хліба. Результати дослідження показані на рис. 5.5.

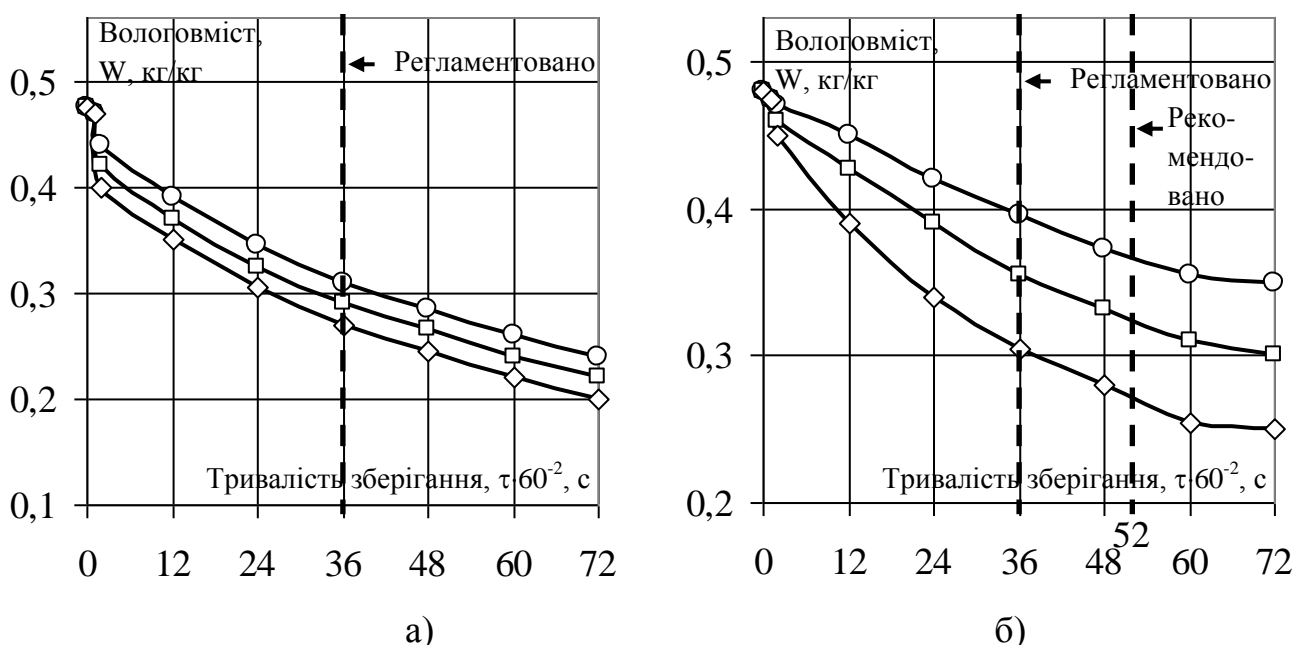


Рис. 5.5. Кінетика вологовмісту житньо-пшеничного хліба в процесі зберігання «Дарницький» – контроль (а), «Харківський родничок» з 0,15% ХДМ (б) (—○— – 70%, —□— – 50%, —◇— – 80%)

З даних рис. 5.5 видно, що при відносній вологості повітря 65%, 70%, 75% протягом від 2 год до 36 год зберігання хліб «Харківський родничок» втрачає вологу повільніше, ніж контрольний зразок (хліб «Дарницький»).

У хлібі «Харківський родничок» черствіння відбувається повільніше порівняно з традиційним виробом «Дарницький», що дозволяє подовжити терміни його зберігання на 16 год. за рахунок вологоутримувальної здатності ХДМ. Раціональними умовами зберігання хліба «Харківський родничок» є відносна вологість повітря (75 ± 2) % і температура (18 ± 5) °С [9–11]. Безпечність хліба «Харківський родничок» оцінювали за мікробіологічними показниками. Результати досліджень наведені в табл. 5.6.

Таблиця 5.6

**Мікробіологічні показники житньо-пшеничного хліба
«Харківський родничок» (через 36 год зберігання)**

Найменування показника	Норматив	Хліб «Харківський родничок»
КМАФАнМ, КУО/г	Не більше $1,0\times 10^3$	$0,9\times 10^2$
Дріжджі КУО/г	Не більше $1,0\times 10$	4,0
БГКП (коліформи)	Не допускаються в 0,1 г	Не виявлено
Патогенні м/о, у тому числі бактерії роду <i>Salmonella</i>	Не допускаються в 25,0 г	Не виявлено
Плісняві гриби КУО/г	Не більше $5,0\times 10$	10

Як видно з табл. 5.6, мікробіологічні показники хліба «Харківський родничок» протягом регламентованого терміну зберігання (36 год) відповідають нормативної документації і свідчать про його високі санітарно-мікробіологічні характеристики. Новизна технічних рішень за складом та способом виробництва хліба житньо-пшеничного «Харківський родничок» підтверджена патентами України на корисні моделі (Додатки Б.12, Б.22), розроблена і затверджена в установленому порядку нормативна документація (Додатки Ж.3, Ж.4, Л.3), випущени дослідні партії продукту (Додатки Д.3, Д.15), проведені виробничі відробки технології хліба (Додаток П.1) та отримані акти впровадження у продовольче забезпечення Національної академії Національної гвардії України (НАНГУ) (Додаток Р.2), у ФО-П «Ведерников» (Додаток Р.14) та навчальний процес НАНГУ (Додаток Р.6).

5.3 Технологія заварних пряників з використанням ХДМ

Базовою для розроблення нового виду пряників обрана рецептура пряників заварних «Ленінградські» з какао-порошком [533]. У табл. 5.7

наведено рецептури заварних пряників з уведенням 0,15% ХДМ (у вигляді ЖС) до маси рецептурної суміші (дослід) та контролю (пряники «Ленінградські»).

Таблиця 5.7

Рецептури заварних пряників «Ленінградські» (контроль) та пряників з внесенням 0,15% харчової добавки «Магнетофуд» (ХДМ)

Найменування сировини	Витрати сировини на н/ф на 1 т готової продукції (без матеріалів для упаковки), кг	
	Заварні пряники	
	«Ленінградські» Зразок 1 – контроль	з 0,15% ХДМ Зразок 2 – дослід
Борошно пшеничне 1 гат.	413,36	412,36
Борошно житнє сіяне	95,71	95,71
Цукор-пісок	230,89	229,29
Мед натуральний	221,95	221,95
Маргарин	56,00	53,00
Меланж	11,70	11,70
Сода харчова	1,54	1,54
Вуглекислий амоній	7,28	7,28
Какао-порошок	11,19	11,19
Кориця	3,05	3,05
Паленка	10,18	10,18
Жирова суспензія ХДМ	–	3,0
Разом	1068,97	1068,97
Вихід	1000,00	1048,00

Виходячи з функціонально-технологічного потенціалу ХДМ щодо комплексоутворювальної, водо- і жирутримувальної здатності у тістових системах (див. розділ 4), ХДМ впливає на час тістоутворення, фізико-хімічні показники та структурно-механічні властивості пряникового тіста. Тому під час формування тістових заготовок під впливом НЧМ можливе отримання більш стійких виробів, а їх геометрія може бути значно різноманітною.

У табл. 5.8. наведені фізико-хімічні показники та структурно-механічні властивості дослідних зразків пряникового тіста, звідки видно, що при введенні ХДМ у кількості 0,15% до маси рецептурної суміші (у вигляді ЖС) збільшуються граничне напруження зсуву в 1,12...1,16 раз; пластична

в'язкість в 1,28...1,33 раза. Зменшується час утворення тіста на $(2,0 \pm 0,2) \times 60$ с та густина тіста в 1,17...1,19 раза порівняно з контролем.

Таблиця 5.8

Фізико-хімічні показники та структурно-механічні властивості дослідних зразків пряникового тіста

Найменування показника	Дослідні зразки пряникового тіста	
	Заварні пряники	
	«Ленінградські» Зразок 1 – контроль	з 0,15% ХДМ Зразок 2 – дослід
Масова частка вологи, %	24,3±1,2	25,6±1,3
Густина, г/см ³	1,29±0,06	1,17±0,04
Граничне напруження зсуву, Па	505,0±20,0	575,0±22,0
Адгезійна міцність (сталь), кПа	2,7±0,1	2,1±0,1
Пластична в'язкість, кПа·с (при $\dot{\gamma}=0,02$ с ⁻¹)	7,5±0,4	9,8±0,5
Час утворення тіста, $\tau \cdot 60$ с	6,5±0,3	4,5±0,2

Такі зміни даних показників пояснюються здатністю НЧМ до утворення сольвато- і ліпідокомплексів та більш міцному утриманню вологи і жиру в структурі тістової маси й через активізацію біохімічних процесів. Крім того, ХДМ сприяє зниженню адгезійної міцності порівняно з контролем на $(22,2 \pm 0,1)\%$ до поверхні зі сталі за рахунок зниження вмісту вільної вологи на поверхні тіста через зв'язування вологи НЧМ. Результати органолептичної оцінки якості пряників наведено у Додатках А.6, К.10 і К.10 та рис. 5.6.

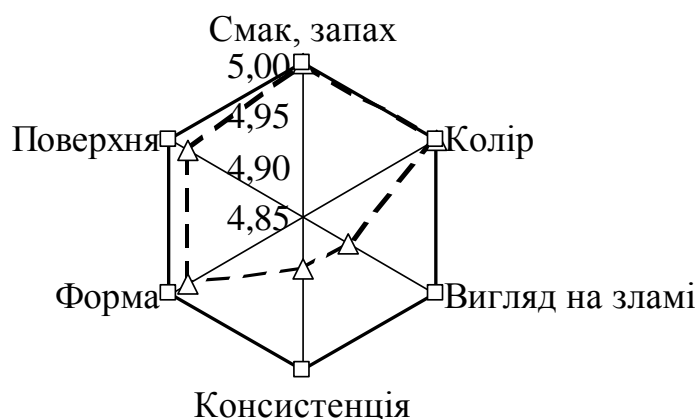


Рис. 5.6 Органолептичні показники зразків заварних пряників «Ленінградські» (контроль) та пряників з 0,15% ХДМ (—Δ— — пряники "Ленінградські" – контроль, —□— — пряники з 0,15% ХДМ)

Як видно з рис. 5.6, введення ХДМ покращує консистенцію та вигляд на зламі готових виробів порівняно з пряниками «Ленінградські». За результатами досліджень розроблено технологічну схему виробництва пряників «Харківські» (Додаток А. 9 та рис. 5.7) [502].

Процес приготування рецептурної суміші для заварних пряників здійснюється таким чином. Житнє борошно заварюється, заварка охолоджується. Далі здійснюється заміс тіста з заварки, підготовлених сипучих компонентів, жирів, розпушувачів та ЖС харчової добавки «Магнетофуд».

Готове тісто формують за допомогою металевих форм. Випічка виробів здійснюється протягом $(11...13) \times 60$ с при температурі $(200...240)$ °С. Після випічки пряники охолоджують, глазують і зберігають протягом 30 діб. На склад і спосіб їх виробництва отримані патенти України (Додатки Б.15, Б. 24).

Як видно зі схеми (Додаток А.6 та рис. 5.7), відмінною особливістю технологічного процесу приготування пряників «Харківські» є введення ЖС харчової добавки «Магнетофуд» при замісі тіста.

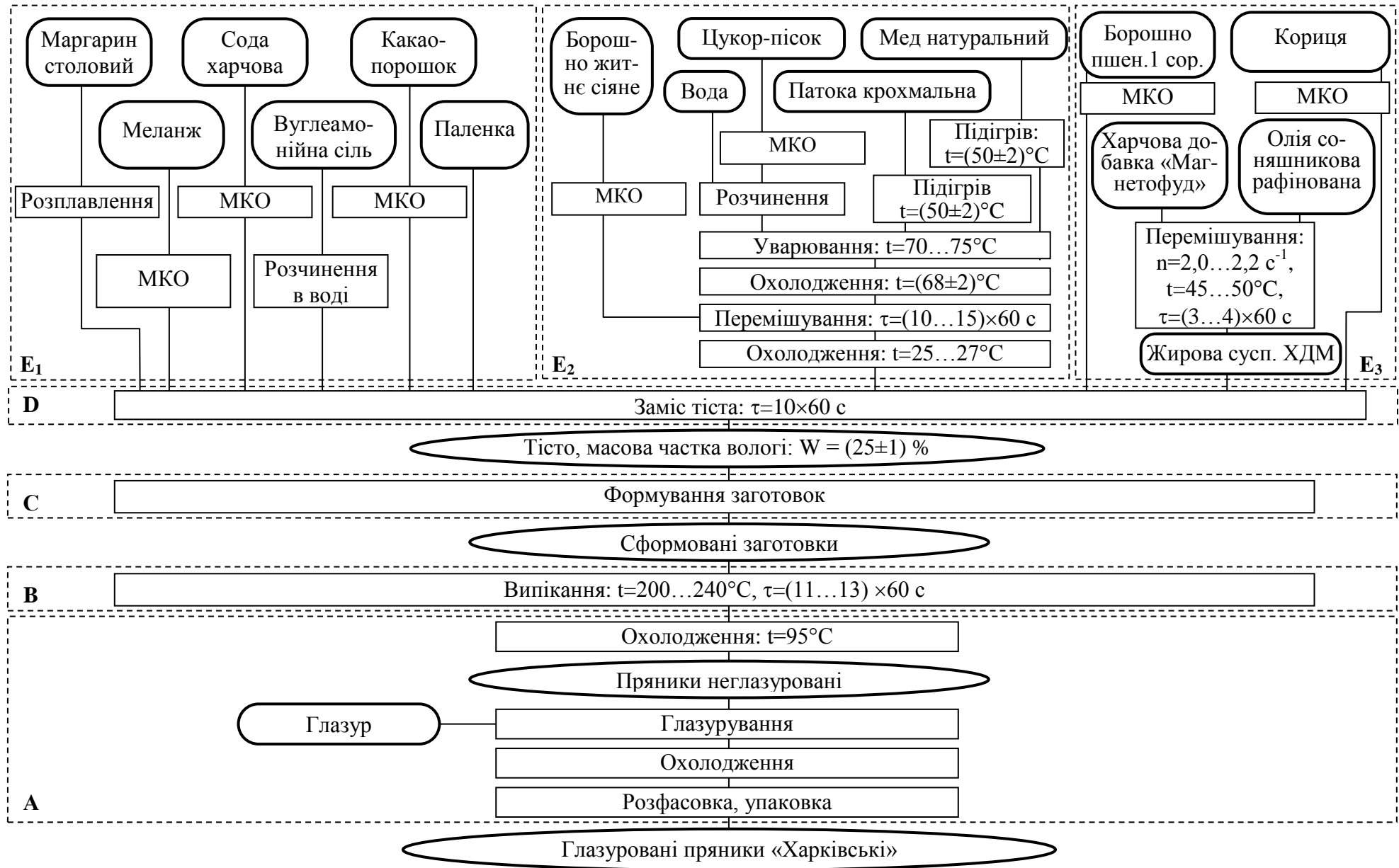


Рис. 5.7. Технологічна схема виготовлення пряників «Харківські»: А, В, С, D, E₁, E₂, E₃ – підсистеми технологічної схеми виробництва пряників

У таблиці 5.9 наведено показники якості та вихід заварних пряників «Харківські» з введенням ХДМ та «Ленінградські», виготовлених за традиційною технологією.

Таблиця 5.9

Показники якості заварних пряників

Найменування показника	Заварні пряники	
	«Ленінградські» – контроль	«Харківські» з 0,15% ХДМ
Масова частка вологи, %	9,8±0,5	10,2±0,5
Лужність, градуси	2,0±0,1	1,60±0,08
Густина, г/см ³	0,52±0,03	0,41±0,02
Намочуваність, %	195,0±9,8	234,0±10,9
Кришливість, %	1,60±0,08	0,90±0,03
Розжовування, бали	4,5±0,2	5,0±0,2
Вихід, %	84,4±4,2	89,5±4,4
Втрати при термообробці, %	9,9±0,5	9,3±0,4

Як видно з табл. 5.9, пряники «Харківські» з ХДМ мають кращі показники якості порівняно з пряниками «Ленінградські» (контроль), виготовленими за традиційною технологією: збільшуються вихід на 5,5...6,0%, намочуваність в 1,18...1,22 раза; покращується розжовування на (11,1±0,2)%; зменшуються густина на (21,1±0,02) % (через активізацією біохімічних процесів), кришливість в 1,7...1,9 раза, втрати при термообробці на 5,3...5,9%, лужність в 1,23...1,27 раза (за рахунок амфотерності НЧМ). Позитивний ефект ХДМ пояснюється здатністю її наночастинок корегувати жиро- і водоутримання, сприяти рівномірному розподілу вологи в об'ємі тістової заготовки. У результаті покращується текстура та розжовування; зменшується крошливість; збільшується пористість, намочуваність і вихід готових виробів.

У табл. 5.10 наведено мікробіологічні показники якості заварних пряників «Харківські» у процесі зберігання протягом регламентованого терміну: 30 діб при температурі (18±5) °С і відносній вологості повітря $\varphi=(75\pm 2)\%$.

**Мікробіологічні показники якості заварних пряників «Харківські»
в процесі зберігання (30 діб, $t=(18\pm 5)^\circ\text{C}$, $\varphi=(75\pm 2)\%$)**

Найменування показника	Норматив	Заварні пряники «Харківські» з 0,15% ХДМ
КМАФАнМ, КУО/г	Не більше $1,0 \times 10^4$	$1,0 \times 10^2$
Дріжджі КУО/г	Не більше 50	25
БГКП (коліформи)	Не допускаються в 1,0 г	Не виявлено
Патогенні м/о, у тому числі бактерії роду <i>Salmonella</i>	Не допускаються в 25,0 г	Не виявлено
Плісняві гриби КУО/г	Не більше 50	27

З табл. 5.10 випливає, що мікробіологічні показники заварних пряників «Харківських» протягом регламентованого терміну зберігання не відрізнялися від встановлених норм, що свідчить про їх високі санітарно-мікробіологічні характеристики. Здатність до черствіння заварних пряників «Харківські» та «Ленінградські» (контроль) в процесі зберігання досліджувалася тензометричним методом (рис. 5.8).

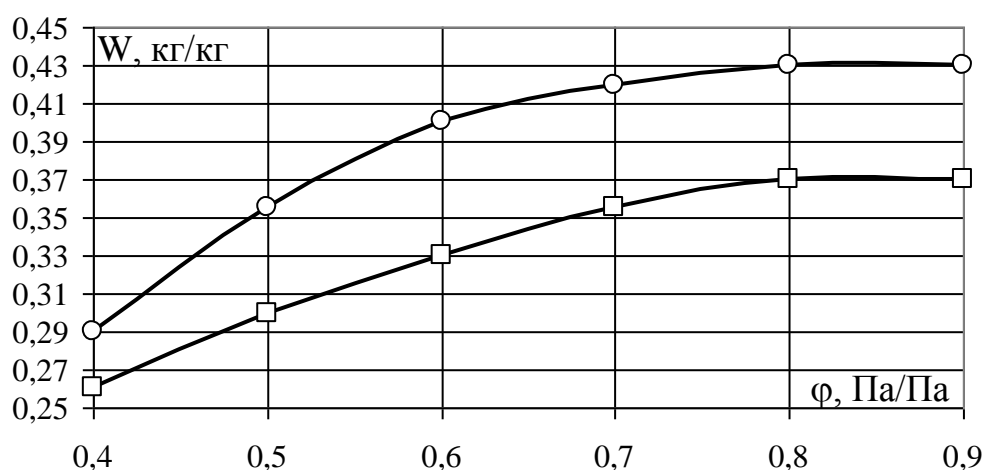


Рис. 5.8. Ізотерми сорбції пряників «Ленінградські» і «Харківські» при температурі $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ (—□—пряники «Ленінградські» – контроль, —○— пряники «Харківські» з 0,15% ХДМ)

Аналіз ізотерм сорбції заварних пряників показує, що введення ХДМ сприяє утриманню в продукті зв'язаної води. При $\varphi=0,7$ (70% відносної

вологості повітря в приміщенні) кількість зв'язаної води в пряниках «Харківські» становить 42%, а в пряниках «Ленінградські» 35% (в 1,2 раза менше), що сприяє подовженню терміну збереження свіжості пряникових виробів з ХДМ. На пряники «Харківські» з використанням ХДМ розроблена нормативна та технологічна документація (Додатки Ж.7, Ж.8, Л.4). У виробничих умовах ТОВ «Чарівна Мозаїка» здійснено виробничі видробки технології пряників (Додаток П.4), а поряд з ФО-П «Ведерников» випущені дослідні партії продукту (Додатки Д.5, Д.13), отримані патенти України [Додатки Б.15, Б.24] та акти упровадження в умовах ТОВ «Чарівна Мозаїка», ФО-П «Ведерников» і в навчальний процес НАНГУ й УПА (Додатки Р.3, Р.15, Р.11, Р.17).

5.4. Технологія вівсяного печива з використанням ХДМ

З метою більш повного розкриття потенціалу ХДМ щодо водо- і жирутримувальної здатності в борошняних виробках досліджували використання цієї добавки в технології вівсяного печива. Базовою для розробки нового виду печива обрана рецептура вівсяного печива № 198 [533]. ХДМ у вівсяне печиво вводили при розтиранні масла у вигляді ЖС у кількості 3 кг на 1000 кг рецептурної суміші, що дорівнює 0,15% ХДМ до маси рецептурної суміші (табл. 5.11).

Таблиця 5.11

Рецептури вівсяного печива за традиційною технологією (контроль) та вівсяного печива з внесенням 0,15% ХДМ (дослід)

Найменування сировини	Витрати сировини на 1,0 т готової продукції, кг	
	Вівсяне печиво	
	за традиційною технологією Зразок 1 – контроль	з 0,15% ХДМ Зразок 2 – дослід
1	2	3
Борошно пшеничне вищого гатунку	344,91	344,91
Борошно вівсяне	147,82	147,82
Цукор-пісок	371,96	371,96
Масло вершкове несолене	163,59	160,59
Вода	95,98	95,98

Продовження таблиці 5.11

1	2	3
Ізюм	52,57	52,57
Сода харчова	4,93	4,93
Сіль кухонна	3,94	3,94
Кориця	0,79	0,79
Ванілін	0,49	0,49
Жирова суспензія ХДМ	–	3,0
Разом	1186,98	1186,98
Вихід	1000,0	1043,0

Виходячи з функціонально-технологічного потенціалу ХДМ щодо стабілізуючої дії на емульсійно-суспензійні системи; механізмів водо- і жирозв'язувальної та водо- і жирутримувальної здатності (див. розділ 4), наночастинки ХДМ можуть впливати на такі функціонально-технологічні показники борошна як: водо- і жирутримувальна здатність (ВУЗ і ЖУЗ), вологозв'язувальна (ВЗЗ), водопоглинальна (ВПЗ) і набухаюча (НЗ) здатність борошна. Перелічені чинники можуть коригувати час утворення, стійкість й ступінь розрідження тіста. У табл. 5.12 наведено такі показники дослідних зразків вівсяно-пшеничного борошна, як: ВЗЗ, ВУЗ, ЖУЗ, ВПЗ, НЗ.

Таблиця 5.12

Показники дослідних зразків вівсяно-пшеничного борошна (30:70)

Найменування показника	Дослідні зразки вівсяно-пшеничного борошна (30:70)	
	Зразок 1 – контроль	Зразок 2 – з 0,15% ХДМ
ВЗЗ, %	232,0±11,6	256,0±12,8
ЖУЗ, %	82,0±4,1	92,0±4,6
НЗ, см ³ /г	2,65±0,13	4,25±0,21
ВПЗ, %	67,0±3,4	73,8±3,7
ВУЗ, %	87,0±4,3	104,0±5,2

Як видно з табл. 5.12, внесення ХДМ у вівсяно-пшеничне борошна (30:70) порівняно з контролем (зразок 1) збільшує: ВЗЗ на 20...22 %; ЖУЗ на 9...11 %; НЗ в 1,5...1,7 раза; ВПЗ на 6,6...7,0 %; ВУЗ на 16...18%. Це пояснюється кращим зв'язуванням води і жиру високомолекулярними

компонентами борошна під впливом НЧМ. Під час формування тістових заготовок НЧМ покращують текстуру та стабілізують різноманітні форми й об'єми готових виробів.

У табл. 5.13 наведено технологічні показники та структурно-механічні властивості дослідних зразків вівсяно-пшеничного тіста.

Таблиця 5.13

**Технологічні показники та структурно-механічні властивості
вівсяно-пшеничного тіста**

Найменування показника	Зразки вівсяно-пшеничного тіста	
	Вівсяне-пшеничне тісто – контроль	Вівсяне-пшеничне тісто з 0,15% ХДМ
Масова частка вологи, %	24,5±1,2	25,9±1,3
Густина, г/см ³	1,25±0,06	1,05±0,06
Граничне напруження зсуву, Па	510,0±25,0	584,0±26,0
Адгезійна міцність (сталь), кПа	2,50±0,12	1,90±0,09
Пластична в'язкість, кПа·с (при $\gamma=0,02 \text{ c}^{-1}$)	7,4±0,3	9,8±0,4
Час утворення тіста, $\tau \cdot 60\text{c}$	6,0±0,3	4,4±0,2
Стійкість тіста, $\tau \cdot 60\text{c}$	7,9±0,3	9,5±0,3
Ступінь розрідження тіста, од.ф.	70,0±3,4	55,0±2,1

Як видно з табл. 5.13, введення ХДМ зменшує густину тіста в 1,17...1,21 раза (за рахунок активізації біохімічних процесів) порівняно з контролем. Слід відзначити саме вплив наночастинок ХДМ на розрідження тіста. Такий вплив зумовлений додатковою поверхнею розділу між твердими НЧМ та рідкою фазою тіста. Унаслідок такої взаємодії напруження зсуву тістової заготовки збільшується, що відбивається на показниках фаринографа: зменшується ступінь розрідження тіста в 1,25...1,27 разів та час утворення тіста на (1,4...1,6)×60 с порівняно з контролем, що пов'язано зі ВУЗ та «кластерофільністю» НЧМ (див. розділ 4).

Крім того, ХДМ підвищує: граничне напруження зсувув в 1,13...1,15 разів; пластичну в'язкість в 1,30...1,33 раза, стійкість тіста в 1,20...1,25 раза та знижує адгезійну міцність на 23,0...24,0 % порівняно з контролем, що

пояснюється утворенням структуровано-сольватованої системи та доведено в розділі 4.

Для оцінки органолептичних властивостей вівсяного печива була складена шкала з урахуванням коефіцієнтів вагомості та бальної характеристики виробів (Додаток А.7). Результати органолептичної оцінки якості вівсяного печива наведено в Додатках К.6, К.9 та на рис. 5.9.

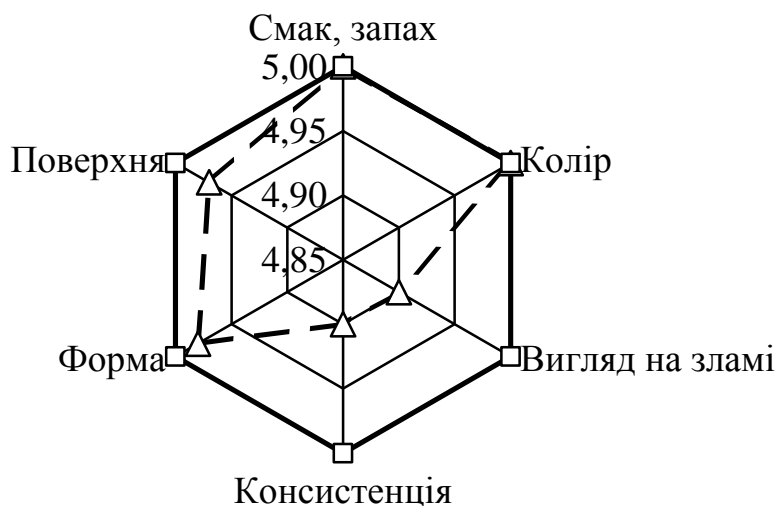


Рис. 5.9. Органолептичні показники зразків вівсяного печива, виготовленого за традиційною технологією (контроль), та печива з використанням 0,15% ХДМ (-Δ- – вівсяне печиво за традиційною технологією – контроль, -□- – вівсяне печиво з 0,15% ХДМ)

Як видно з рис. 5.9, введення ХДМ у кількості 0,15% до маси рецептурної суміші сприяє покращенню консистенції та вигляду на зламі порівняно з вівсяним печивом, виготовленим за традиційною технологією.

За результатами досліджень розроблено технологічну схему виробництва вівсяного печива «Козак» (рис. 5.10 та Додаток А.10) [451, 503, 531], згідно з якою ХДМ вводиться у вигляді ЖС харчової добавки «Магнетофуд» на етапі розтирання масла.

Процес приготування рецептурної суміші для вівсяного печива здійснюється таким чином. Спочатку вершкове масло розтирається з цукром-піском, корицею, подрібненими родзинками, ваніліном і ЖС.

Далі в суміш додається частина борошна, гарячий розчин солі і суміш перемішується. Потім здійснюється заміс тіста з підготовлених жироборошняних, сипучих компонентів та розпушувачів.

Готове тісто формують за допомогою металевих форм. Випічка виробів здійснюється протягом $(10...12) \times 60$ с при температурі $(180...200) ^\circ\text{C}$.

Після випічки вівсяне печиво охолоджують і зберігають протягом 45 діб за температури $t=(18\pm 5) ^\circ\text{C}$ і відносної вологості повітря $\varphi=(75\pm 2) \%$ [503, 531]. На продукт і спосіб його виробництва були отримані патенти (Додатки Б.10, Б.20).

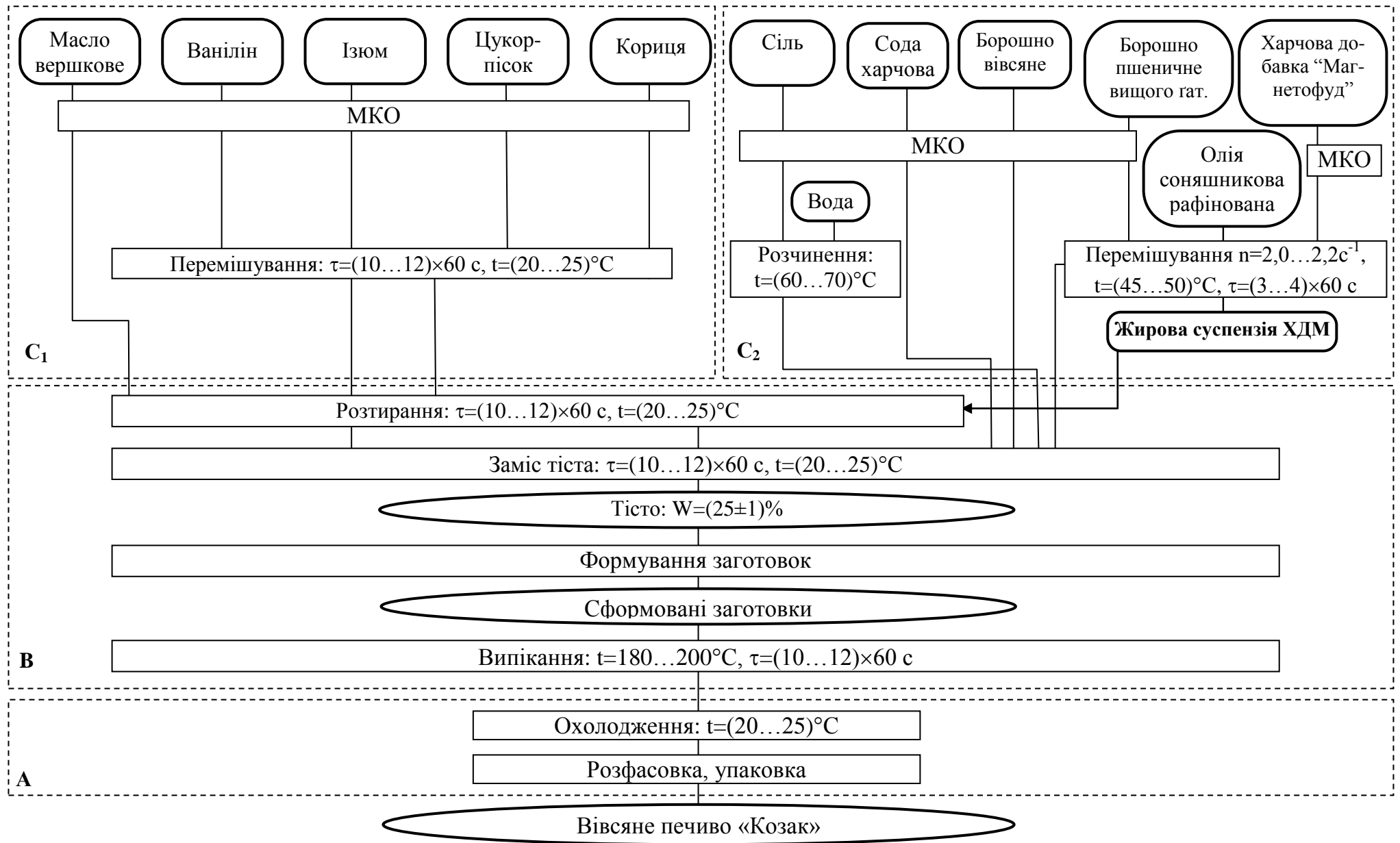


Рис. 5.10. Технологічна схема виготовлення вівсяного печива «Козак»: А, В, С₁, С₂ – підсистеми технологічної схеми виробництва вівсяного печива

Результати досліджень показників якості дослідних зразків вівсяного печива наведені у табл. 5.14.

Таблиця 5.14

Показники якості вівсяного печива, виготовленого за традиційною технологією (контроль) та печива «Козак» з введенням ХДМ

Найменування показника	Зразки вівсяного печива	
	За традиційною технологією – контроль	«Козак» з 0,15% ХДМ
Масова частка вологі, %	5,6±0,3	6,6±0,3
Лужність, %	2,0±0,1	1,80±0,08
Густина, г/см ³	0,56±0,03	0,44±0,02
Намочуваність, %	138,0±6,7	150,0±7,0
Кришливість, %	1,60±0,08	0,85±0,02
Розжовування, бали	4,5±0,2	5,0±0,2
Вихід, %	89,4±4,3	95,7±4,4
Втрати при термообробці, %	10,6±0,5	4,3±0,3

З табл. 5.14 видно, що внесення ХДМ збільшує: вихід на 5,0...7,0%, намочуваність на 11,5...12,5%; розжовування на 10,6...11,6%; зменшує густину в 1,25...1,29 раза, крошливості в 1,8...2,0 раза, втрати при термообробці на 5,3...6,9%; лужність в 1,11...1,13 раза. Невелике збільшення вологості зразків печива з використанням ХДМ пов'язано зі зв'язуванням води НЧМ та зменшенням концентраційного переміщення вологи з шарів центральної частини тістових заготовок до шарів з меншим вмістом вологи, тобто до скоринки, під час випічки. Така тенденція позитивно вплине на стабільність показників якості печива в процесі зберігання. Зменшення лужності печива пов'язано із амфотерними властивостями складових ХДМ (Fe^{2+} , Fe^{3+}), які взаємодіють з компонентами тістової системи, зокрема $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, NaHCO_3 .

У табл. 5.15 наведено мікробіологічні показники якості вівсяного печива «Козак» після зберігання при $t=(18\pm 5)^\circ\text{C}$ протягом 45 діб при відносній вологості повітря $\phi=(75\pm 2)\%$ порівняно з контролем, звідки видно, що мікробіологічні показники вівсяного печива «Козак» протягом

регламентованого терміну зберігання не відрізнялися від встановлених норм, що свідчить про їхні високі санітарно-мікробіологічні характеристики.

Таблиця 5.15

Мікробіологічні показники якості вівсяного печива «Козак» з ХДМ в процесі зберігання (45 діб, $t=(18\pm 5)^\circ\text{C}$, $\varphi=(75\pm 2)\%$)

Найменування показника	Норматив	Вівсяне печиво «Козак» з 0,15% ХДМ
КМАФАнМ, КУО/г	Не більше $1,0 \times 10^4$	$2,5,0 \times 10^2$
Дріжджі КУО/г	Не більше 50	18
БГКП (коліформи)	Не допускаються в 1,0 г	Не виявлено
Патогенні м/о, у тому числі бактерії роду <i>Salmonella</i>	Не допускаються в 25,0 г	Не виявлено
Плісняві гриби КУО/г	Не більше 50	26

З табл. 5.15 випливає, що мікробіологічні показники вівсяного печива «Козак» протягом регламентованого терміну зберігання не відрізнялися від встановлених норм, що свідчить про їхні високі санітарно-мікробіологічні характеристики.

На рис 5.11 наведено вплив ХДМ на вологість ($W, \%$), стискуваність (P , од. прил.) та кришливість ($Kp, \%$) дослідних зразків вівсяного печива протягом регламентованого терміну зберігання (45 діб), звідки видно, що вологість контрольного зразка після 45 діб зберігання знизилася на 28,5 %, а вівсяного печива «Козак» – повільніше, лише на 15,1%. Це пов'язано з функціональністю наночастинок ХДМ, що стабілізує розгалужені структури молекул біополімерів (зокрема, амілопектину) та сприяє уповільненню переміщення вологи з внутрішніх шарів виробів до поверхні під дією градієнта температури і вологості; також збільшує кількість зв'язаної води в печиві. Крім того, для кількісної оцінки швидкості черствіння зразків вівсяного печива при зберіганні досліджували його стискуваність – ступінь penetрації (P) (рис. 5.11) [503, 531], яка при зберіганні знижувалася, але використання ХДМ сприяло меншим змінам консистенції зразку печива «Козак» в 1,22...2,8 раза за рахунок водоутримувальної здатності НЧМ, яка

сприяє збереженню вологи вівсяного печива в процесі зберігання, тобто уповільнює його висихання.

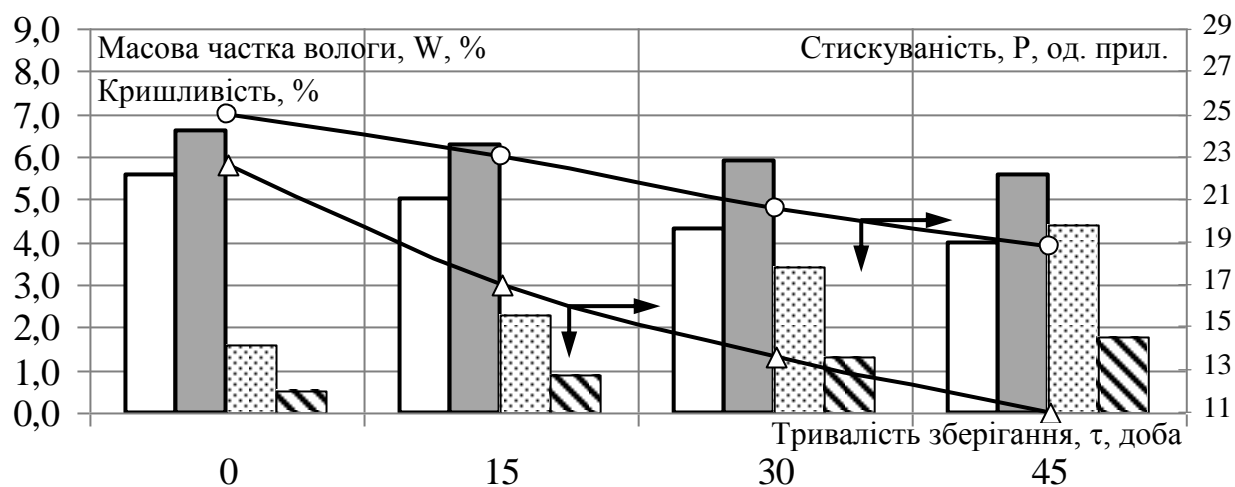


Рис. 5.11. Вологість (W), кришливість (Кр), стискуваність (Р) зразків вівсяного печива при зберіганні: \square – W (вівсяного печива за традиційною технологією), \blacksquare – W (вівсяного печива «Козак»), ▨ – Кр (вівсяного печива за традиційною технологією), ▩ – Кр (вівсяного печива «Козак»), $\text{—}\triangle\text{—}$ – Р (вівсяного печива за традиційною технологією), $\text{—}\circ\text{—}$ – Р (вівсяного печива «Козак»)

Відомо, що в процесі зберігання вівсяного печива відбувається ущільнення структури крохмалю за рахунок агрегації молекул амілози й амілопектину, зменшується об'єм зерен крохмалю і відбувається збільшення їх твердості, внаслідок чого печиво стає кришливим і твердим. Як видно з рис. 5.11, внесення ХДМ у вівсяне печиво «Козак» зменшує показник кришливості у процесі регламентованого терміну зберігання в 2,5...2,9 раза за рахунок сповільнення формування повітряних прошарків між коагульованої білковою масою і зернами крохмалю. Вивчено ізотерми сорбції для вівсяного печива «Козак». Встановлено раціональні умови зберігання: 45 діб при відносній вологості повітря (75 ± 2) % і температурі (18 ± 5) °С [47, 48]. На вівсяне печиво «Козак» з використанням ХДМ розроблена нормативна та технологічна документація (Додатки Ж.5, Ж.6, Л.5). У виробничих умовах ТОВ «Чарівна Мозаїка» здійснено виробничі відробки (Додаток П.7) та поряд з ФО-П «Ведерников» випущені дослідні партії продукту (Додатки Д.4, Д.14) й отримані акти впровадження в умовах ТОВ «Чарівна Мозаїка» (Додатки Р.3, Р.13) і в навчальний процес НАНГУ й УПА (Додатки Р.8, Р.17).

5.5. Технологія м'ясних посічених виробів з використанням ХДМ

Базовими для розробки нових видів м'ясних посічених виробів обрані рецептури котлет № 658 та біфштексів з яловичини № 604 [534]. В табл. 5.16 і табл. 5.17 наведено рецептури котлет (зразки 1–4) та біфштексів з яловичини (зразки 5–8) з введенням харчової добавки «Магнетофуд» (ХДМ) у вигляді жирової суспензії (ЖС) при перемішуванні фаршу у кількості 0,12 г; 0,26 г; 0,38 г (для котлет) на 125 г рецептурної суміші та 0,14 г; 0,28 г; 0,44 г (для біфштексів) на 143 г рецептурної суміші, що дорівнює 0,05 %; 0,10 %; 0,15 % ХДМ від маси рецептурної суміші.

Таблиця 5.16

Рецептури котлет, виготовлених за традиційною технологією (контроль), та котлет з внесенням ХДМ

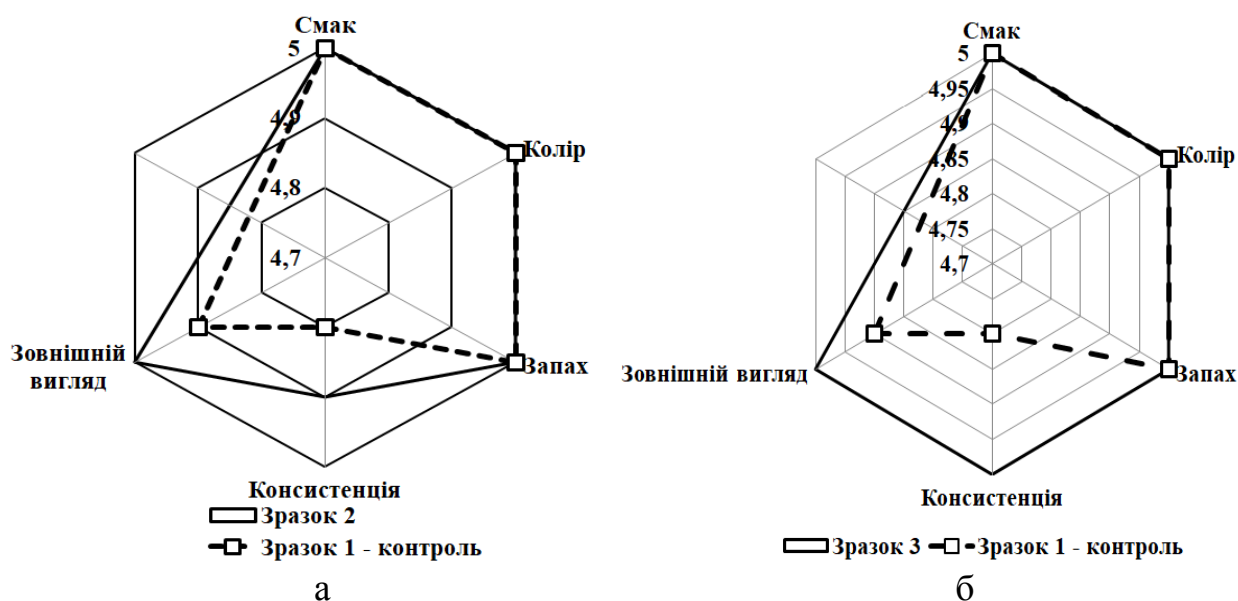
Найменування сировини	Маса сировини, г							
	Зразок 1 – Контроль		Зразок 2 – з 0,05% ХДМ		Зразок 3 – з 0,10% ХДМ		Зразок 4 – з 0,15% ХДМ	
	Брутто	Нетто	Брутто	Нетто	Брутто	Нетто	Брутто	Нетто
Яловичина (м'ясо котлетне)	101,0	74,0	101,0	74,0	101,0	74,0	101,0	74,0
Хліб пшеничний	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
Жирова суспензія ХДМ	0,0	0,0	0,12	0,12	0,26	0,26	0,38	0,38
Вода або молоко	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0	24,0
Сухарі панірувальні	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Сіль кухонна	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Маса напів./фб	–	125,0	–	125,12	–	125,26	–	125,38
Жир кулінарний	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Маса смажених котлет	–	100,0	–	104,0	–	104,5	–	104,7

З метою визначення раціональної кількості ХДМ в рецептурі проведена органолептична оцінка готових кулінарних виробів з різною масовою часткою її вмісту (рис. 5.12 та Додатки А.15–А.17, К.5, К.8).

**Рецептури біфштексів, виготовлених за традиційною технологією
(контроль), та біфштексів з внесенням ХДМ**

Найменування сировини	Маса сировини, г							
	Зразок 5 – Контроль		Зразок 6 – з 0,05% ХДМ		Зразок 7 – з 0,10% ХДМ		Зразок 8 – з 0,15% ХДМ	
	Брутто	Нетто	Брутто	Нетто	Брутто	Нетто	Брутто	Нетто
Яловичина (м'ясо котлетне)	155,0	114,0	155,0	114,0	155,0	114,0	155,0	114,0
Шпик	18,0	17,0	18,0	17,0	18,0	17,0	18,0	17,0
Жирова суспензія ХДМ	0,0	0,0	0,14	0,14	0,28	0,28	0,44	0,44
Молоко або вода	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
Сіль кухонна	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Перець чорний мелений	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Маса напівфабрикату	–	143,06	–	143,2	–	143,34	–	143,5
Жир кулінарний	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Маса смажених біфштексів	–	100,0	–	105,0	–	105,6	–	104,7

На рис. 5.12 наведено органолептичні показники дослідних зразків м'ясних посічених виробів (котлет та біфштексів з яловичини), звідки видно, що найкращі показники мають м'ясні посічені вироби з масовою часткою ХДМ 0,10% від маси рецептурної суміші.



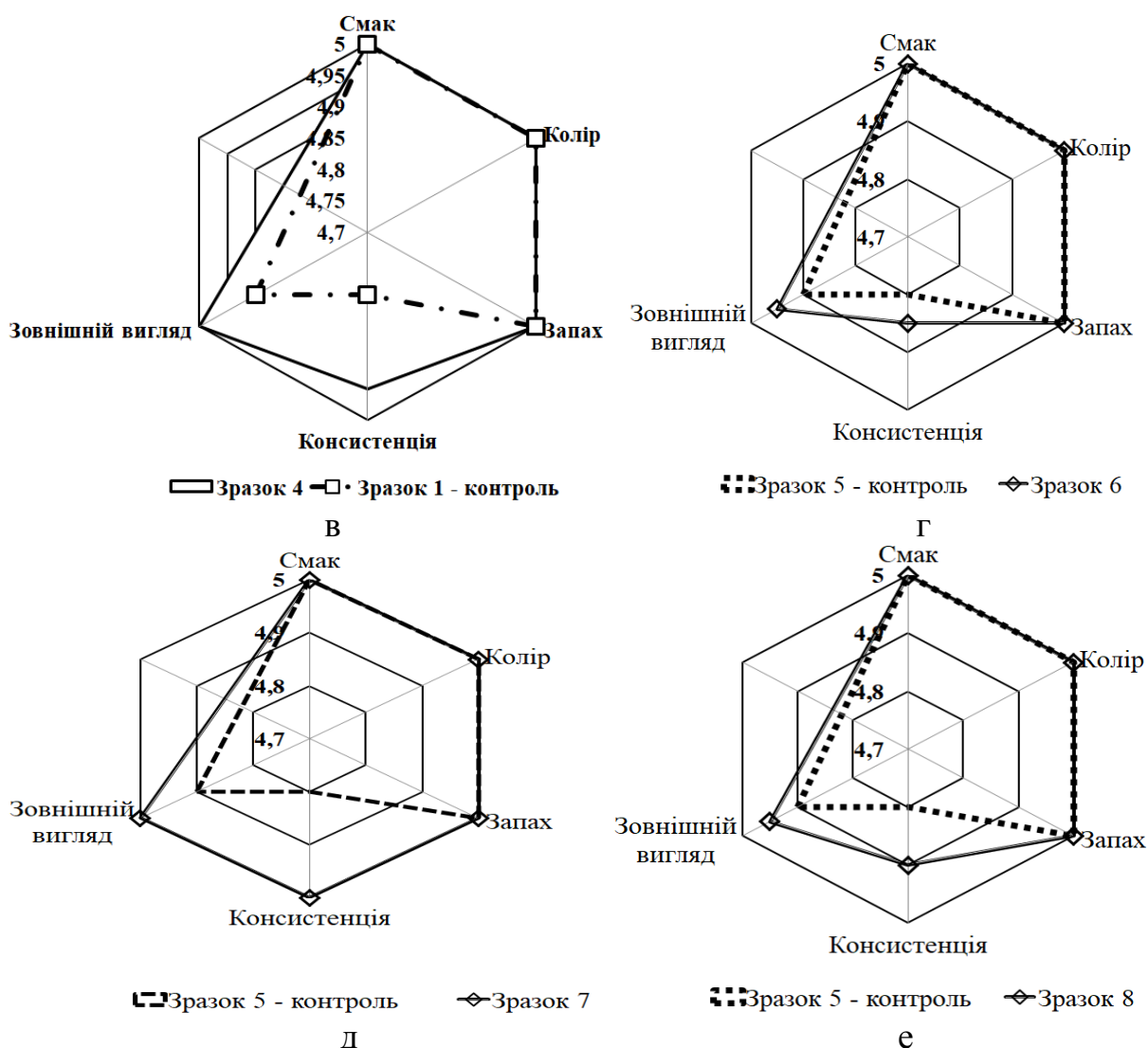


Рис. 5.12. Органолептичні показники дослідних зразків м'ясних посічених виробів: а, б, в – котлет; г, д, е, – біфштексів з яловичини

Отже, готові вироби мали: колір – характерний для м'ясних посічених виробів, однорідно-м'яку і ніжну консистенцію; соковитість з приємним смаком смаженого м'яса і ароматом спецій. Тобто раціональною кількістю ХДМ є 0,10% від маси рецептурної суміші. Технологічні карти котлет «Ситні» та біфштексів з яловичини «Слобожанські» з раціональною часткою ХДМ (0,10% від маси рецептурної суміші) представлені в Додатках Л.1, Л.2.

На етапі формування напівфабрикату, коли формується геометрична форма виробу, проявляються когезійні властивості НЧМ, тому в рецептурі вміст м'ясної сировини та хліба може бути скореговано.

На етапі смаження напівфабрикату було відмічено збереження виробами своєї форми, менші втрати їх маси за рахунок водо- та жирутримання; а також через величину адгезії виробів до жарочної поверхні, через водо- та жирозв'язування наночастинками ХДМ.

На рис. 5.13 наведено ВУЗ, ЖУЗ дослідних зразків м'ясних фаршів, втрати при термообробці і вихід готових виробів.

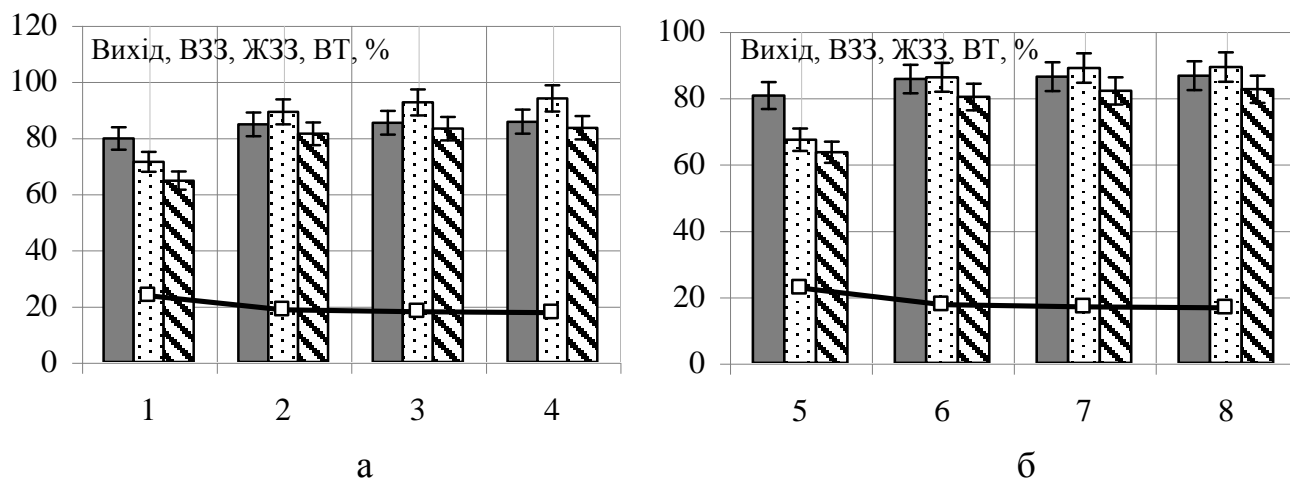


Рис. 5.13. ВУЗ (■), ЖУЗ (▨) дослідних зразків м'ясних фаршів, втрати при термообробці (—□—) і вихід (■) виготовлених з них виробів: а – котлет; б – біфштексів з яловичини

Як видно з рис. 5.13, введення ХДМ в м'ясні фарші в кількості 0,05%; 0,10%; 0,15% від маси рецептурної суміші підвищує їх волого- та жирозв'язувальну здатність в 1,28...1,32 раза і в 1,26...1,29 раза відповідно, що приводить до зменшення втрат при термообробці й збільшення виходу готової продукції на 5,0...6,0%. При цьому кращі показники мали зразки при вмісті ХДМ 0,10%. Подальше збільшення кількості добавки до 0,15% не веде до суттєвого поліпшення даних показників.

Оскільки ХДМ має антиоксидантні властивості, вивчено окисні процеси в жировій складовій дослідних зразків м'ясних фаршів з яловичини з введенням цієї добавки в кількості 0,05%; 0,10%; 0,15 % (під час зберігання протягом 24 год за температури $(6 \pm 1)^\circ\text{C}$). Визначали: кислотне (КЧ) та пероксидне (ПЧ) числа (рис. 5.14).

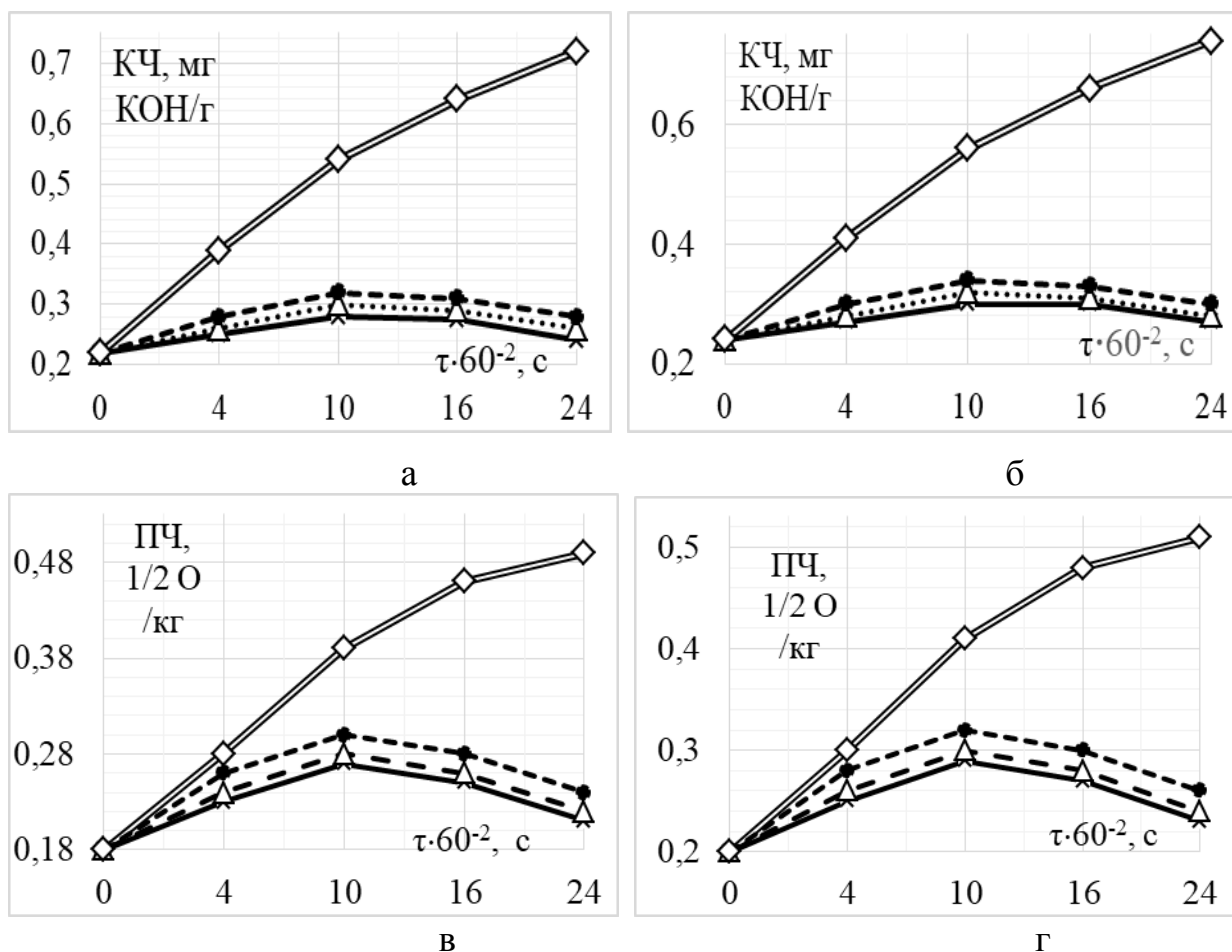


Рис. 5.14. Кінетика окисних процесів дослідних зразків м'ясних фаршів протягом зберігання: а, б – кислотне число (КЧ); в, г – пероксидне число (ПЧ): \square – Зразки 1, 5 (контроль); \bullet – Зразки 2, 6; \blacktriangle – Зразки 3, 7; \times – Зразки 4, 8

З рис. 5.14 видно, що значення кислотного (КЧ) та пероксидного (ПЧ) чисел відповідає нормативній документації та поступово збільшується в усіх зразках м'ясних фаршів протягом зберігання, але в зразках з ХДМ повільніше: КЧ менше в 1,8...2,9 раза, ПЧ менше в 1,3...2,2 раза порівняно з контролем. Це пов'язано з утворенням проміжних комплексів з атомами кисню пероксидних радикалів і гідрогенпероксидів за участю атомів ферума НЧМ та уповільненням процесів гідролізу (накопичення вільних жирних кислот) жирів, стабілізованих наночастинками ХДМ у супрамолекулярні ансамблі, алей сорбують на частинках ХДМ деяку кількість жирних кислот завдяки амфотерності катіонів ферума, розвиненої

питомої поверхні та високої сорбційної активності ХДМ. Це сприяє збільшенню термінів зберігання та покращенню якості м'ясних фаршів посічених виробів.

На рис. 5.15 наведено активну кислотність у дослідних зразках м'ясних фаршів у процесі зберігання протягом трьох діб за температури 5...7°C.

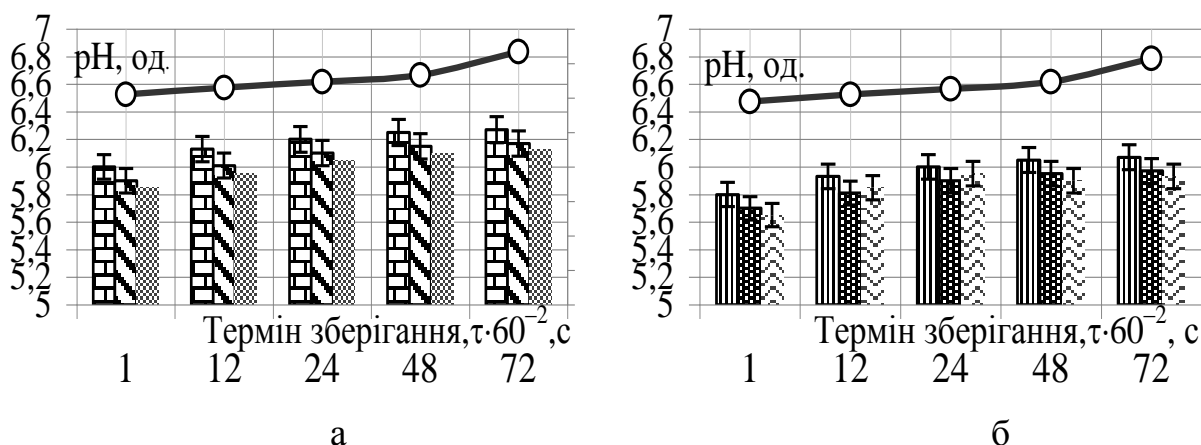


Рис. 5.15. Активна кислотність рН у дослідних зразках м'ясних фаршів у процесі зберігання: а – для котлет; б – для біфштексів з яловичини (—○— - Контроль (зразки 1, 5), ▨ - Зразок 2, ▩ - Зразок 3, ▪ - Зразок 4, ▫ - Зразок 6, ▬ - Зразок 7, ▭ - Зразок 8)

Як видно з рис. 5.15, додавання в м'ясні фарші ХДМ уповільнює в 1,15...1,2 раза зростання активної кислотності порівняно з контролем за рахунок хемосорбції органічних кислот на поверхні НЧМ. Це може послужити підґрунтям для подовження терміну збереження свіжості м'ясних фаршів. У табл. 5.18 наведено водо- (ВУЗ) і жиротримувальна (ЖУЗ), жироемульгувальна (ЖЕЗ) здатність, стабільність емульсії (СЕ) у дослідних зразках м'ясних фаршів.

Таблиця 5.18

ВУЗ, ЖУЗ, ЕЗ, СЕ дослідних зразків м'ясних фаршів

Дослідні зразки м'ясних фаршів	ВУЗ, %	ЖУЗ, %	ЖЕЗ, %	СЕ, %
1	2	3	4	5
Зразок 1 – контроль	71,1±3,6	64,6±3,0	33,2±1,9	75,2±2,6
Зразок 2 – з 0,05% ХДМ	88,9±3,9	81,2±3,4	41,2±2,3	91,9±2,9

1	2	3	4	5
Зразок 3 – з 0,10% ХДМ	92,4±4,0	83,0±3,7	41,6±2,5	93,0±3,9
Зразок 4 – з 0,15% ХДМ	93,8±4,1	83,5±3,8	42,1±2,6	93,5±3,8
Зразок 5 – контроль	67,3±3,6	63,2±3,0	34,3±1,9	75,8±2,6
Зразок 6 – з 0,05% ХДМ	86,2±3,9	80,1±3,4	42,8±2,3	92,4±2,9
Зразок 7 – з 0,10% ХДМ	88,7±4,0	82,1±3,7	43,4±2,5	93,7±3,9
Зразок 8 – з 0,15% ХДМ	89,0±4,1	82,3±3,8	43,7±2,6	94,0±3,8

Як видно з табл. 5.18, спостерігається поступове зростання ВУЗ, ЖУЗ, ЕЗ, СЕ зі збільшенням масової частки ХДМ від 0,05% до 0,15% порівняно з контрольними зразками збільшуються: ВУЗ (1,28...1,32) рази, ЖУЗ (1,26...1,29) рази, ЖЕЗ (1,24...1,26), СЕ в (1,22...1,24) рази. Встановлено, що раціональною масовою часткою добавки є 0,10 % від маси рецептурної суміші. Граничне напруження зсуву (ГНС) найбільш чутливо до зміни технологічних і механічних чинників. Тому цей показник використовували для оцінки м'ясного фаршу і посічених виробів з м'яса в процесі їх виготовлення (рис. 5.16) [6–8].

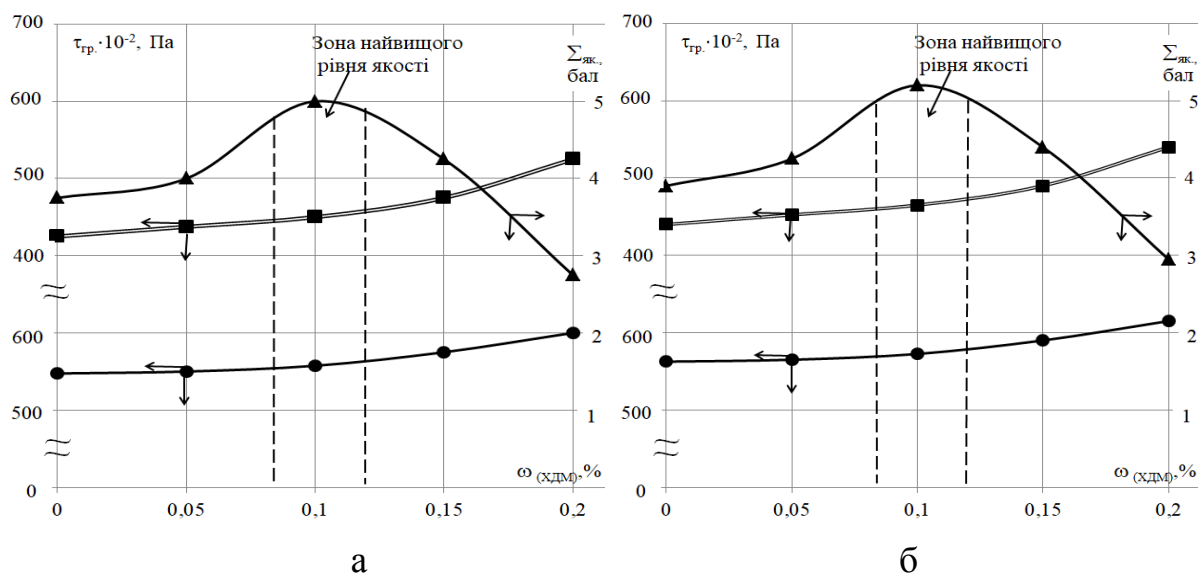


Рис. 5.16. Граничне напруження зсуву $\tau_{гр}$ й рівень якості $\Sigma_{як.}$ дослідних зразків м'ясного фаршу та готових виробів з різною масовою часткою ХДМ, %: а – котлет; б – біфштексів з яловичини (▲ – рівень якості, ■ – м'ясний фарш, ● – м'ясний посічений напівфабрикат)

Як видно з рис. 5.16, граничне напруження зсуву всіх зразків м'ясних фаршів і готових виробів збільшується в (1,30...1,35) раза порівняно з контролем. Причому в разі готових виробів, що пройшли теплову обробку, інтенсивність збільшення сповільнюється. Збільшення значення ГНС зі збільшенням кількості ХДМ пов'язано зі здатністю НЧМ до гелеутворення, унаслідок чого утворюється колоїдна система, сформована за рахунок взаємозв'язку сольватованих міцел НЧМ і гідрофільної оболонки мікрочастинок фаршу, яка і надає опір зовнішньому впливу [445, 457, 466, 504, 514, 516].

При дослідженні зсувних властивостей фаршевих систем на еластопластометрі Толстого було вивчено деякі величини, які обумовлюють описані вище структурно-механічні характеристики готових посічених виробів з м'яса. Значення отриманих показників наведено на рис. 5.17 та рис. 5.18.

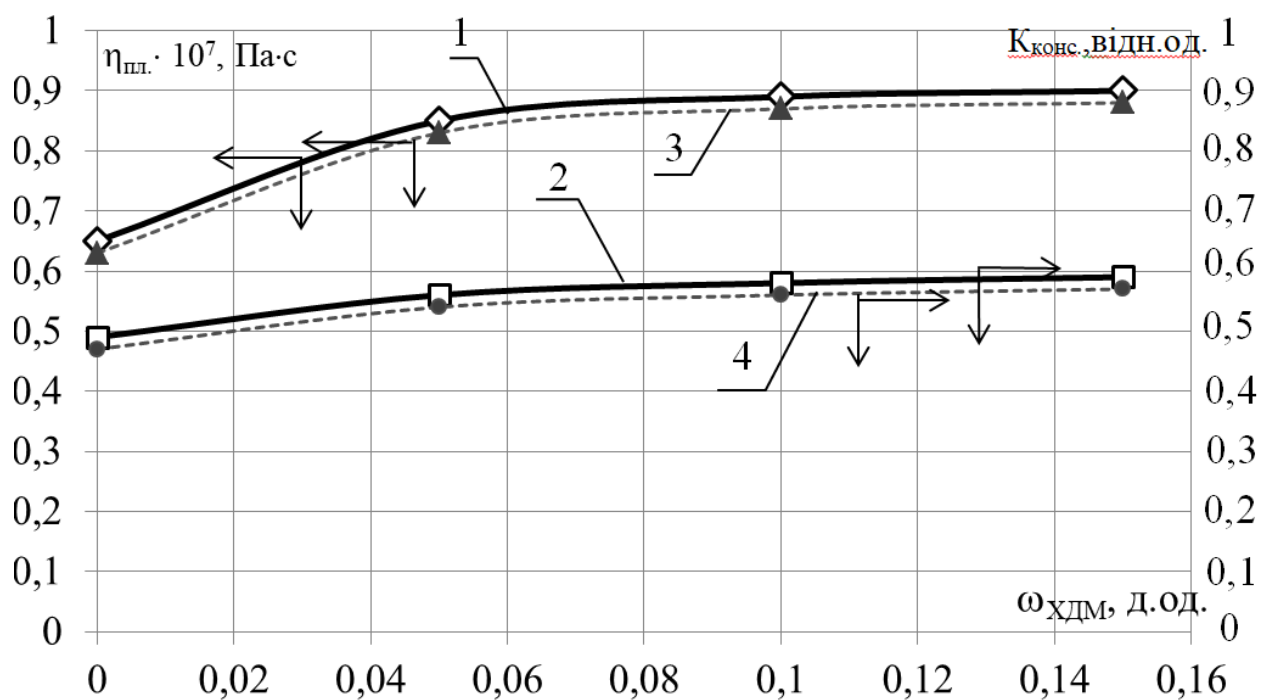


Рис. 5.17. Пластична в'язкість $\eta_{пл.}$ і коефіцієнт консистенції $K_{конс.}$ дослідних зразків м'ясних фаршів: для котлет (1 — \diamond — $\eta_{пл.}$, 2 — \square — $K_{конс.}$); для біфштексів з яловичини (3 — \blacktriangle — $\eta_{пл.}$, 4 — \bullet — $K_{конс.}$)

З рис. 5.17 видно, що зі збільшенням масової частки ХДМ в дослідних зразках м'ясних фаршів порівняно з контролем збільшуються: пластична в'язкість в 1,36...1,4 раза, коефіцієнт консистенції в 1,12...1,15 раза.

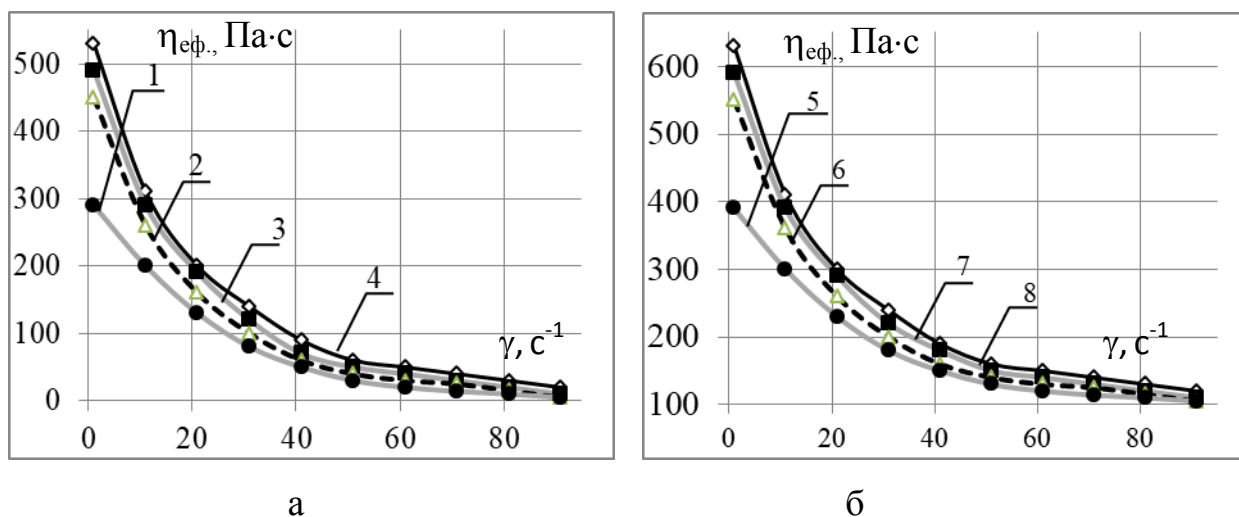


Рис. 5.18. Залежність ефективної в'язкості η_{ef} від швидкості зсуву γ дослідних зразків м'ясних фаршів: для котлет – 1, 2, 3, 4; для біфштексів з яловичини – 5, 6, 7, 8

З рис. 5.18 видно, що зі збільшенням швидкості зсуву ефективна в'язкість всіх зразків м'ясних фаршів зменшується, однак, дозування ХДМ від 0,05% до 0,15% уповільнює цей процес і збільшує ефективну в'язкість м'ясних фаршів в 1,6...1,7 рази. Такі зміни показників пов'язані зі гелеутворювальною та стабілізуювальною дією НЧМ, які, вступаючи в кулонівські і координаційні взаємодії з іонногенними групами макромолекул білків м'ясних фаршів, утворюють супрамолекулярні асоціати і стабілізують фаршеву систему [504, 514, 516]. Для дослідних зразка м'ясних фаршів з введенням ХДМ у кількості 0,05%, 0,10%, 0,15% отримані рівняння, що показують залежність ефективної в'язкості (η_{ef}) від швидкості зсуву (γ) (табл. 5.19). Показник ступеня в усіх рівняннях показує індекс плинності зразків м'ясних фаршів і класифікацію їх як в'язко-пластичних продуктів. Ці рівняння необхідні для реодинамічних розрахунків і дльбору обладнання.

Таблиця 5.19

Результати розрахунку коефіцієнтів k і α в рівнянні $\eta_{\text{ef}}=k \cdot \gamma^{-\alpha}$ для дослідних зразків м'ясних фаршів

Дослідні зразки м'ясних фаршів	Коефіцієнт пропорційності, k	Індекс плинності, α
1	2	3
Зразок 1 – контроль	285,12	-0,896

Продовження таблиці 5.19

1	2	3
Зразок 2 – з 0,05% ХДМ	454,21	-0,996
Зразок 3 – з 0,10% ХДМ	489,65	-1,004
Зразок 4 – з 0,15% ХДМ	493,16	-1,008
Зразок 5 – контроль	285,14	-0,897
Зразок 6 – з 0,05% ХДМ	454,23	-0,997
Зразок 7 – з 0,10% ХДМ	489,67	-1,005
Зразок 8 – з 0,15% ХДМ	493,18	-1,009

У таблиці 5.20 наведені деякі структурно-механічні показники дослідних зразків фаршів з яловичини.

Таблиця 5.20

Структурно-механічні властивості дослідних зразків м'ясних фаршів з яловичини ($n=5, p \leq 0,5$)

Дослідні зразки м'ясних фаршів	Модуль миттєвої пружності, Па	Високо-еластичний модуль, Па
Зразок 1– контроль	4428±89	1596±38
Зразок 2 – з 0,05% ХДМ	4934±89	1689±39
Зразок 3 – з 0,10% ХДМ	5262±90	1807±41
Зразок 4 – з 0,15% ХДМ	5294±91	1842±42
Зразок 5 – контроль	4432±88	1601±38
Зразок 6 – з 0,05% ХДМ	4939±89	1694±39
Зразок 7 – з 0,10% ХДМ	5267±90	1812±41
Зразок 8 – з 0,15% ХДМ	5299±91	1847±42

Як видно з табл. 5.20, внесення ХДМ у кількості 0,05%, 0,10%, 0,15% сприяє покращенню структурно-механічних властивостей м'ясних фаршів [504, 514, 516].

Модуль миттєвої пружності, який характеризує пружні властивості м'ясних фаршів з яловичини і здатність до відновлення його початкової

форми після зняття навантаження, при внесенні ХДМ збільшується в 1,18...1,22 раза порівняно з контролем. Це свідчить про підвищення пружності фаршевої системи з додаванням НЧМ та її модифікації силами ван-дер-ваальса і координаційними зв'язками з наночастинками ХДМ. Високоеластичний модуль зразків фаршів зростає в 1,15...1,17 раза порівняно з контролем. Тобто еластичність фаршевої системи покращується за рахунок ВУЗ харчової добавки «Магнетофуд», що приводить до зв'язування вологи, утворення сольватасоціатів НЧМ з мікрочастинками фаршу. Утворена просторова структурна сітка має еластичність, здатність згинатися і згортатися. Що зумовлює м'яку консистенцію та покращує формоутримувальну здатність м'ясних фаршів. На рис. 5.19 наведено адгезійну міцність (сталь) дослідних зразків м'ясних фаршів.

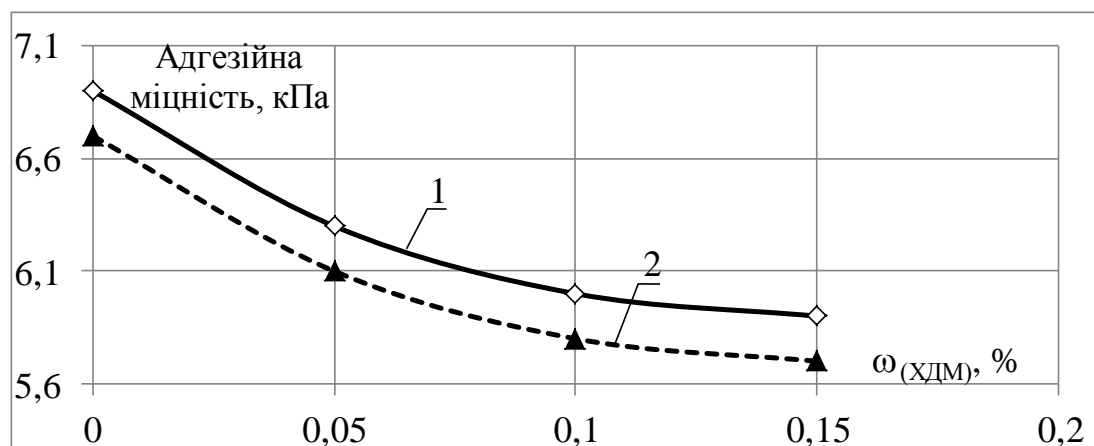


Рис. 5.19. Адгезійна міцність (сталь) дослідних зразків м'ясних фаршів:

1 – для котлет; 2 – для біфштексів з яловичини

З рис. 5.19 видно, що зі збільшенням масової частки ХДМ знижується адгезійна міцність зразків м'ясних фаршів порівняно з контролем: на 8,7% при внесенні 0,05% ХДМ, на 13,0% – 0,10% ХДМ і на 14,5% – 0,15% ХДМ до поверхні зі сталі за рахунок водоутримувальної здатності цієї добавки.

Унаслідок проведених досліджень встановлено, що введення ХДМ в м'ясні фарші покращує функціонально-технологічні властивості фаршевих систем залежно від внесеної кількості. А проведені дослідження граничного

напруження зсуву, ефективної в'язкості і адгезії м'ясних фаршів дозволили кількісно оцінити їх основні реологічні параметри, які потрібні для вибору оптимальних технологічних процесів (перемішування, порціонування, формування) при виробництві м'ясних посічених виробів.

Результати досліджень використані в розробці технології м'ясних посічених виробів з ХДМ. Технологічна схема виробництва м'ясних посічених виробів з ХДМ у вигляді ЖС розглянута на прикладі котлет «Ситні» (рис. 5.20); для біфштексів «Слобожанські» на рис. А.18.1 Додатку А.18. Технологічну схему як систему можна представити у вигляді таких підсистем: D (D_1 , D_2) – підготовка сировини до виробництва;

С – приготування рецептурної суміші;

В – формування напівфабрикату;

А – теплова обробка напівфабрикату.

Підсистема D. Для виготовлення м'ясних посічених виробів, а саме котлет «Ситні» з ХДМ, використовують такі шматки м'якоті: яловичина – м'якоть шийної частини, пашина та обрізки, які утворюються при обробленні туші, а також крайка від туш II категорії. При підготовці сировини до виробництва всі шматки м'якоті зачищають від сухожилля і грубої сполучної тканини. Для приготування виробів котлетне м'ясо заморожене розморожують до температури в товщі м'язів від -1°C до 0°C . Котлетне м'ясо розрізають на шматки $4 \times 4 \times 4$ см, промивають холодною проточною водою. Хліб пшеничний черствий зачищають від шкоринки, замочують у молоці або воді протягом $(5 \dots 7) \times 60$ с. Сіль просівають через сито з розміром отворів не більше $2,0 \times 10^{-3}$ м. Підготовлене котлетне м'ясо і замочений хліб пшеничний подрібнюють на м'ясорубці з діаметром отворів $d = (3 \dots 4) \times 10^{-3}$ м.

Підсистема С. ЖС харчової добавки «Магнетофуд» вводять у рецептурний склад при премішуванні фаршу.

Підсистема В. З готової фаршевої маси виробляють напівфабрикат овально-приплюснутої форми з загостреним кінцем товщиною (2,0–2,5) см, який потім панірують у сухарях.

Підсистема А. Сформований напівфабрикат відразу направляють на теплову обробку або поміщають в холодильну камеру для охолодження при температурі $(6\pm 1)^\circ\text{C}$. Напівфабрикати кладуть на сковороду або лист з жиром, нагрітим до температури $150\dots 160^\circ\text{C}$ й обсмажують $(3\dots 5)\times 60$ с з обох боків до утворення піджареної скоринки, а потім доводять до готовності в духовці при температурі $250\dots 280^\circ\text{C}$ протягом $(5\dots 7)\times 60$ с. Готові кулінарні посічені вироби з м'яса мають температуру в центрі не нижче $(85\pm 1)^\circ\text{C}$.

При відпустці кулінарних посічених виробів з м'яса котлет «Ситні» та біфштексів з яловичини «Слобожанські» рекомендовано гарнірувати згідно з рекомендаціями Збірника рецептур [534]. Технологічні карті виготовлення котлет «Ситні» та біфштексів з яловичини «Слобожанські» приведена в Додатках Л.1 та Л.2 відповідно.

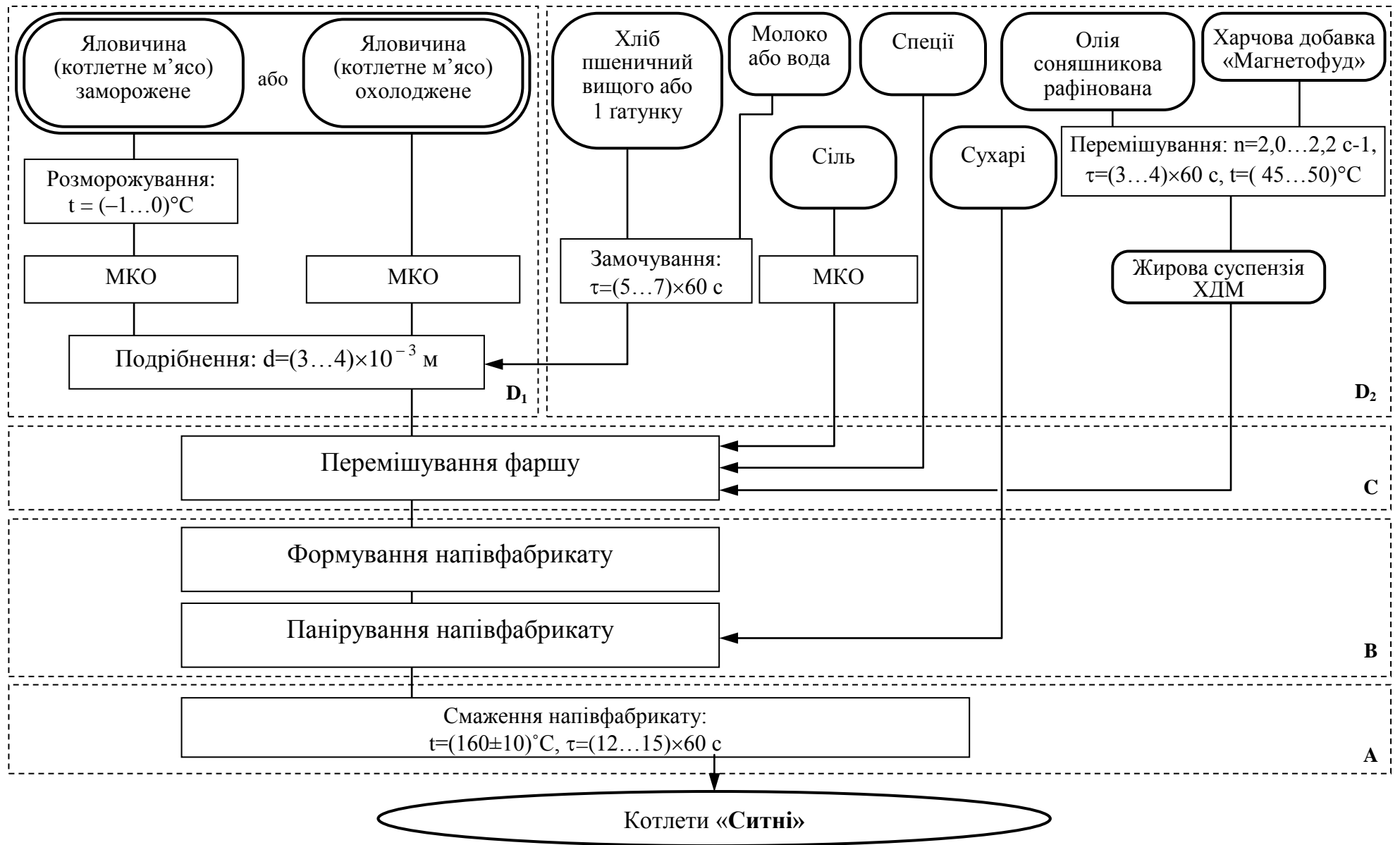


Рис. 5.20. Технологічна схема виготовлення котлет «Ситні»: А – теплова обробка напівфабрикату, В – формування напівфабрикату, С – приготування рецептурної суміші, D – підготовка сировини до виробництва – підсистеми технологічної схеми виробництва котлет «Ситні»

Біологічну цінність посічених виробів з м'яса – котлет «Ситні» та біфштексів з яловичини «Слобожанські» – характеризували за перетравлюваністю їх білків протеолітичними ферментами шлунково-кишкового тракту *in vitro* [447, 466]. Безпечність котлет та біфштексів оцінювали за мікробіологічними показниками готових виробів [466, 514, 516]. Для оцінки біологічної цінності посічених виробів з м'яса, приготованих з використанням ХДМ, вивчено ступінь перетравлюваності в організмі людини (рис. 5.21).

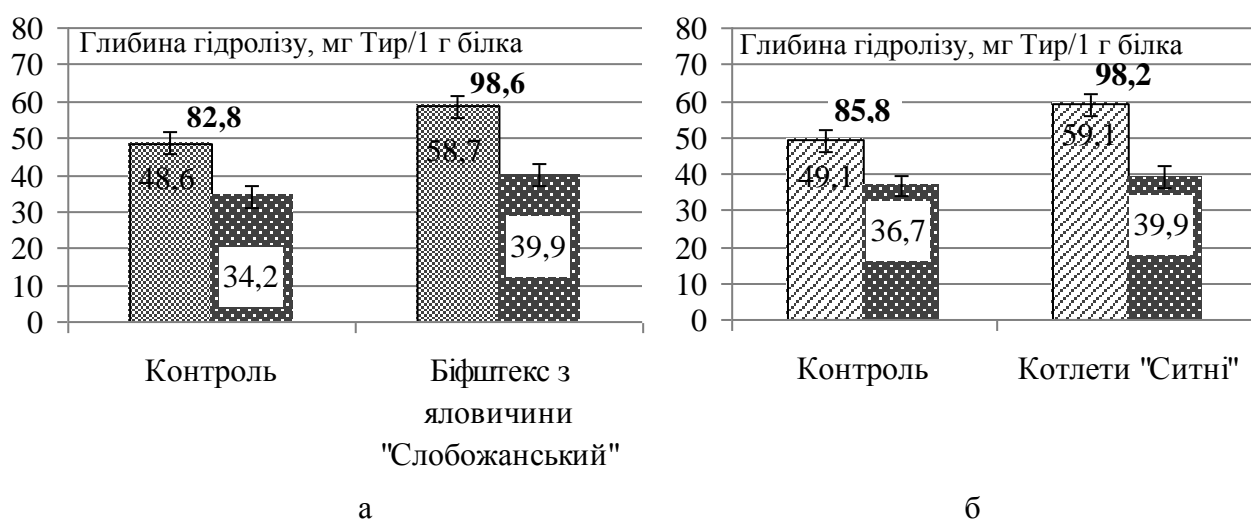


Рис. 5.21. Ферментативний гідроліз зразків готових м'ясних посічених виробів: а – котлет «Ситні»; б – біфштексів з яловичини «Слобожанські» (■ – трипсиноліз, ■ – пепсиноліз)

З рис. 5.21 видно, що як на стадії пепсинолізу, так і на стадії трипсинолізу перетравлюваність білка м'ясних посічених виробів вища, ніж котлет і біфштексів, виготовлених за традиційною технологією, у середньому в 1,15...1,2 раза, при цьому сумарний ефект перетравлювання вищий в (1,16–1,19) раза за рахунок активізувальної дії НЧМ на протеолітичні ферменти шлунково-кишкового тракту (пепсину та трипсину) через утворення комплексів типу «білок ферменту – наночастинка Магнетофуд».

Оцінка якості котлет «Ситні» та біфштексів з яловичини «Слобожанські» за мікробіологічними показниками свідчить про їх гігієнічну безпеку (табл. 5.21).

Таблиця 5.21

Мікробіологічні показники зразків котлет «Ситні» та біфштексів з яловичини «Слобожанські» порівняно з контролем під час зберігання (12 год)

Найменування показника	Норматив	Дослідні зразки м'ясних посічених виробів	
		<i>Термін зберігання 12 годин за температури від +2 °С до +6 °С</i>	
		Котлети «Ситні» з 0,10% ХДМ	Біфштекси з яловичини «Слобожанські» з 0,10% ХДМ
КМАФАнМ, КУО/г, через 12 год.	Не більше $1,0 \times 10^5$	9×10^2	7×10^2
БГКП (коліформи), в 0,001 г, через 12 год.	Не допускаються	Не виявлено	Не виявлено
Патогенні м/о, у тому числі бактерії роду <i>Salmonella</i> і <i>L. Mopolcytogenes</i> , в 25,0 г, через 12 год.	Не допускаються	Не виявлено	Не виявлено
Бактерії роду <i>S. aureus</i> , в 1,0 г, через 12 год.	Не допускаються	Не виявлено	Не виявлено
Бактерії роду <i>Proteus</i> , в 0,1 г, через 12 год.	Не допускаються	Не виявлено	Не виявлено

Як видно з табл. 5.21, мікробіологічні показники котлет «Ситні» та біфштексів з яловичини «Слобожанські» протягом регламентованого терміну зберігання не відрізнялися від встановлених норм, що свідчить про їх високі санітарно-мікробіологічні характеристики.

На котлети «Ситні» та біфштекси «Слобожанські» отримані патенти на склад і спосіб виробництва (Додатки Б.6, Б.7, Б. 21); розроблена і затверджена в установленому порядку технологічна документація (Додатки Л.1, Л.2), випущені дослідні партії продуктів (Додатки Д.2), отримані акти упровадження (Додатки Р.9, Р.16).

5.6. Технологія десерту «Слоненя» із сиру кисломолочного з використанням ХДМ

Як доведено у розділах 3, 4 і п.5.1, введення ХДМ у кількості 0,10%; 0,15%; 0,20% від маси сировини (що є незначною часткою в загальній кількості) впливає на: стійкість жирових і білкових суспензій; піностійкість та піноутворювальну здатність білків.

Для створення рецептурної композиції сиркового десерту як базова була використана традиційна рецептура десерту із сиру кисломолочного (табл. 5.22) [456], в яку ХДМ вводилася у вигляді ЖС при перемішування сиру кисломолочного у кількості 0,2 г; 0,3 г; 0,4 г на 100 г рецептурної суміші, що дорівнює 0,1%; 0,15%; 0,2% ХДМ від маси рецептурної суміші [456, 458, 528].

Таблиця 5.22

Рецептури десертів із сиру кисломолочного, виготовлених за традиційною технологією (контроль), та з внесенням ХДМ

Найменування сировини	Маса сировини нетто, г			
	Зразок 1 – контроль	Зразок 2 – з 0,10% ХДМ	Зразок 3 – з 0,15% ХДМ	Зразок 4 – з 0,20% ХДМ
Сир кисломолочний 15%-ної жирності	70,0	70,0	70,0	70,0
Сметана 20%-ної жирності	20	20,0	20	20
Цукор-пісок (пудра)	10	9,8	9,7	9,6
Жирова суспензія ХДМ	–	0,2	0,3	0,4
Вихід готової страви	100,0	100,0	100,0	100,0

ЖС харчової добавки «Магнетофуд» додавали в рецептурну суміш дослідних зразків сиркових десертів при попередньому змішуванні ($n=2,0 \dots 2,2 \text{ c}^{-1}$) з половинною кількістю сметани протягом $(3 \dots 4) \times 60 \text{ c}$ з подальшою витримкою суміші протягом $(27 \dots 30) \times 60 \text{ c}$. При цьому,

спостерігалася сольватація вологи сметани НЧМ і фарбування сметани. Розрахунок загальної органолептичної оцінки десертів з сиру кисломолочного з ХДМ наведено в Додатку А.19. Для обґрунтування масової частки ХДМ в рецептурі сиркового десерту проведена його органолептична оцінка, результати якої представлені на рис. 5.22 (акти дегустації – в Додатках К.7, К.12).

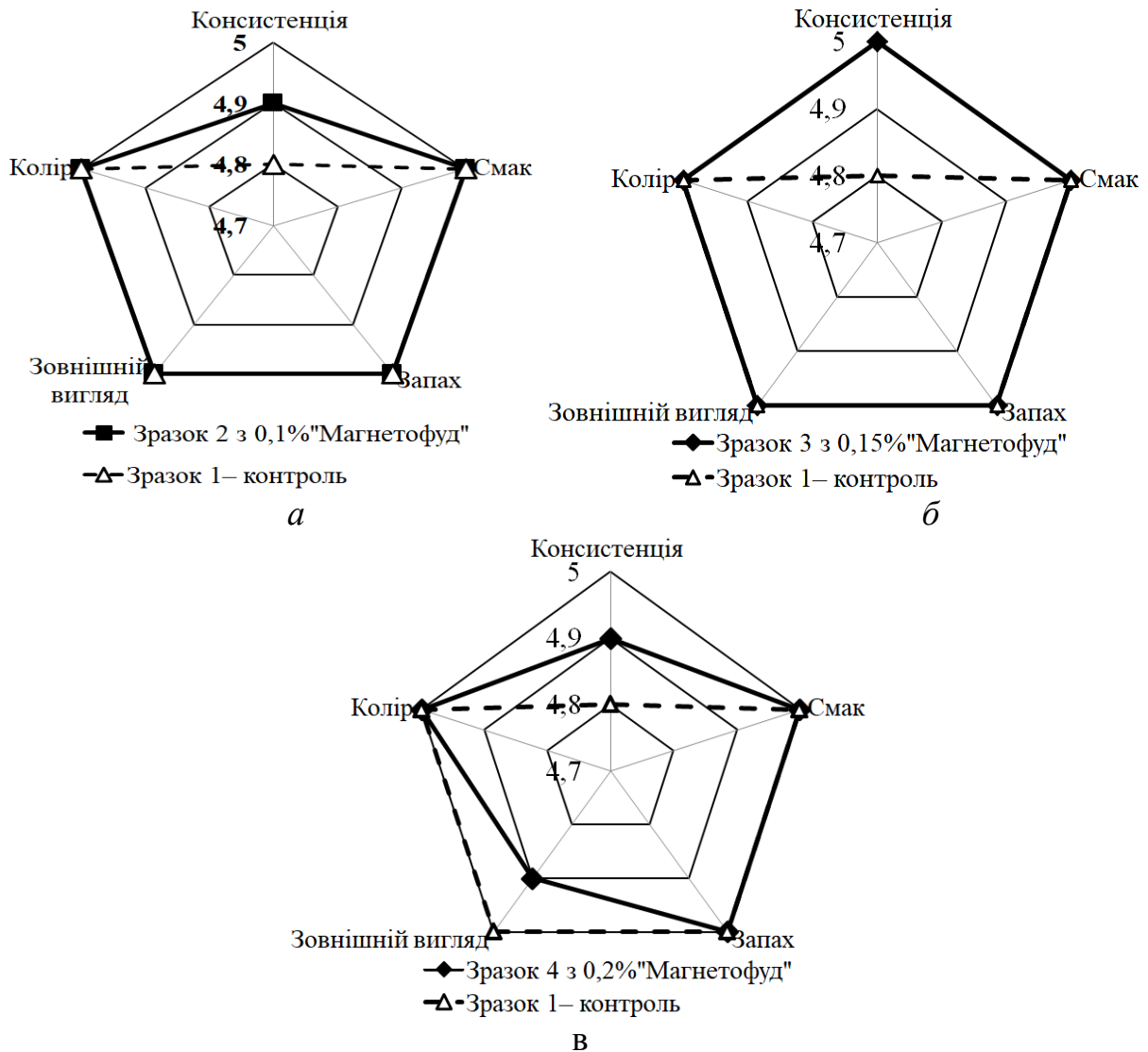


Рис. 5.22. Органолептичні показники якості дослідних зразків десертів з сиру кисломолочного з різною масовою часткою ХДМ у порівнянні з контролем: а – 0,10%; б – 0,15%; в – 0,20%

Як видно з рис. 5.22, кращими зовнішнім виглядом та консистенцією характеризувався десерт з масовою часткою ХДМ 0,15%. Тому раціональний

вміст ХДМ становив 0,15 % від маси рецептурної суміші. Відомо, що напруження зсуву характеризує міцність зв'язків в асоціативних комплексах поліфазної структури, НЧМ (що мають структуроутворювальну здатність) [475, 500], тому слід очікувати їх певний вплив на структуру харчової системи. Дослідження напруження зсуву зразків сиркових десертів виконано безпосередньо після приготування і після 24 годин зберігання при температурі (12–14) °С (рис. 5.23).

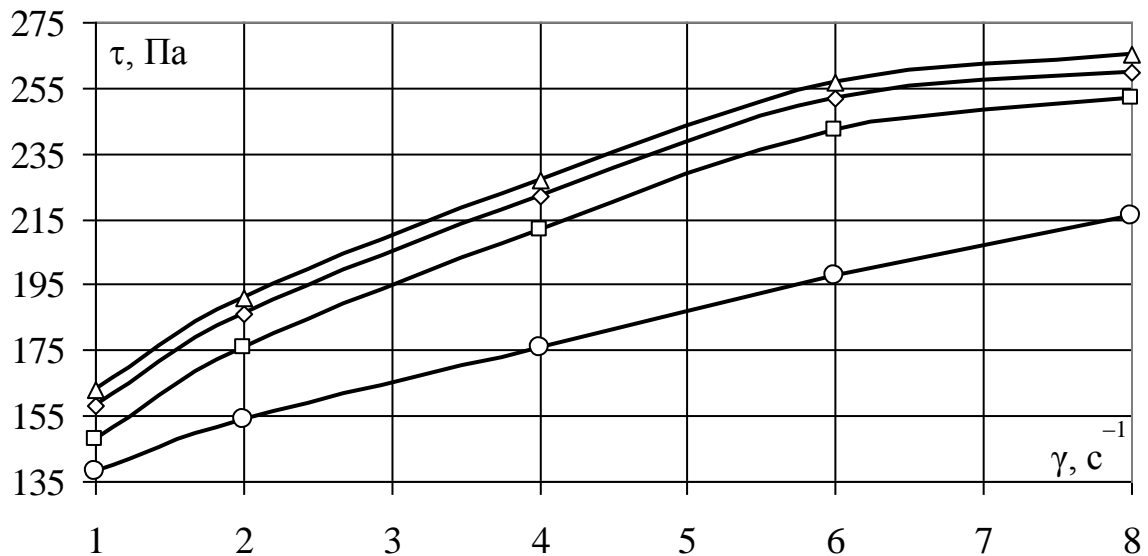


Рис.5.23. Напруження зсуву дослідних зразків сиркових десертів:
 —○— контроль, —□— 0,1% ХДМ, —◇— 0,15% ХДМ, —△— 0,2% ХДМ

З рис. 5.23 видно, що введення ХДМ функціонально впливає на структурно-механічні характеристики десерту з сиру кисломолочного: зі зростанням масової частки ХДМ збільшуються максимальне напруження зсуву в 1,18...1,3 раза (також, нахил залежності $\tau = f(\gamma)$ більший відносно контрольного зразка) та коефіцієнт тиксотропії (рис. 5.24) в 1,26 раза порівняно з контролем. Встановлено, що такий характер впливу позитивно позначається на текстурі продукту. Тобто функціонально, крім кольороформування, ХДМ коригує структурно-механічні властивості виробів з кисломолочного сиру та дещо пом'якшує структуру десерту (за рахунок водо- та жирутримувальної

здатності) [475, 528], але при цьому не змінює стабільність десерту протягом всього терміну зберігання продукту, тому що в'язкість сиркових десертів протягом 24 годин зберігання не змінювалася.

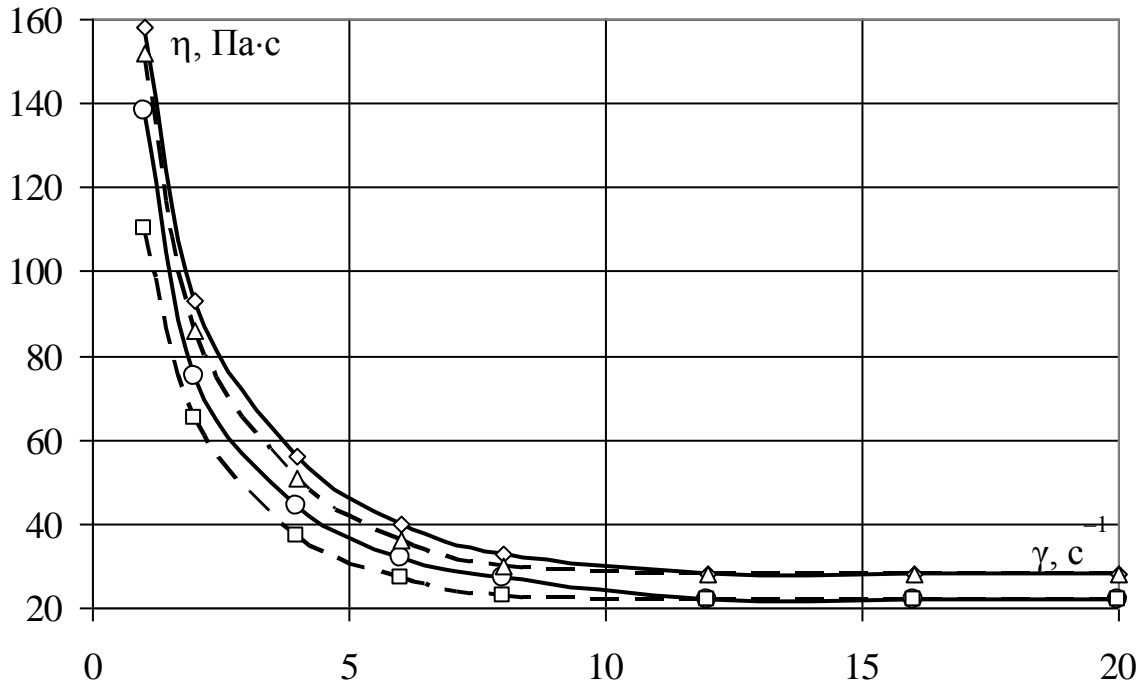


Рис. 5.24. Тиксотропні властивості сиркових десертів: контролю та «Слоненя» з 0,15% ХДМ: \circ – контроль (прямий хід), \square – контроль (зворотній хід), \diamond – десерт «Слоненя» (прямий хід), \triangle – десерт «Слоненя» (зворотній хід)

Оскільки однією з технологічних операцій при виробництві десертів з сиру є збивання (частота обертів робочого органу $5,8 \dots 6,0 \text{ c}^{-1}$) протягом $(8 \dots 10) \times 60 \text{ c}$, були вивчені основні технологічні властивості сиркового десерту – ступінь збиття і кінетика об'єму збитої маси протягом 24 год зберігання (табл. 5.23).

Таблиця 5.23

Кінетика об'єму дослідних зразків десертів із сиру кисломолочного при зберіганні

Час зберігання, год	Об'єм дослідних зразків сиркових десертів, cm^3			
	Зразок 1 – контроль	Зразок 2 (0,1% ХДМ)	Зразок 3 (0,15% ХДМ)	Зразок 4 (0,2% ХДМ)
1	2	3	4	5
0	$100 \pm 0,8$	$100 \pm 0,8$	$100 \pm 0,8$	$100 \pm 0,8$

Продовження таблиці 5.23

1	2	3	4	5
6	$81,6 \pm 0,8$	$91,2 \pm 0,8$	$97,9 \pm 0,8$	$98,1 \pm 0,8$
12	$75,5 \pm 0,7$	$86,5 \pm 0,8$	$94,6 \pm 0,8$	$94,9 \pm 0,8$
18	$66,4 \pm 0,7$	$79,3 \pm 0,7$	$87,5 \pm 0,8$	$87,9 \pm 0,8$
24	$66,4 \pm 0,7$	$74,5 \pm 0,7$	$84,6 \pm 0,7$	$85,0 \pm 0,7$

Як видно з табл.5.23, при введенні ХДМ в кількості 0,10%; 0,15%; 0,20% від маси рецептурної суміші спостерігається ефект стабілізації структури дослідних зразків десертів з сиру кисломолочного, що пояснюється комплексуювальними властивостями атомів Fe та утворенням координаційних та електростатичних зв'язків НЧМ з білками сиру, які зміцнюють пінну структуру сиркового десерту, оскільки це сприяє піноутворенню і фіксації пухирців повітря в системі. Дослідження кількості повітряних пухирців і розподілу їх за діаметром проведено за допомогою монокулярного мікроскопа БІОЛАМ ЛОМО при загальному збільшенні в 400 разів і при використанні цифрової фотокамери (рис.5.25).

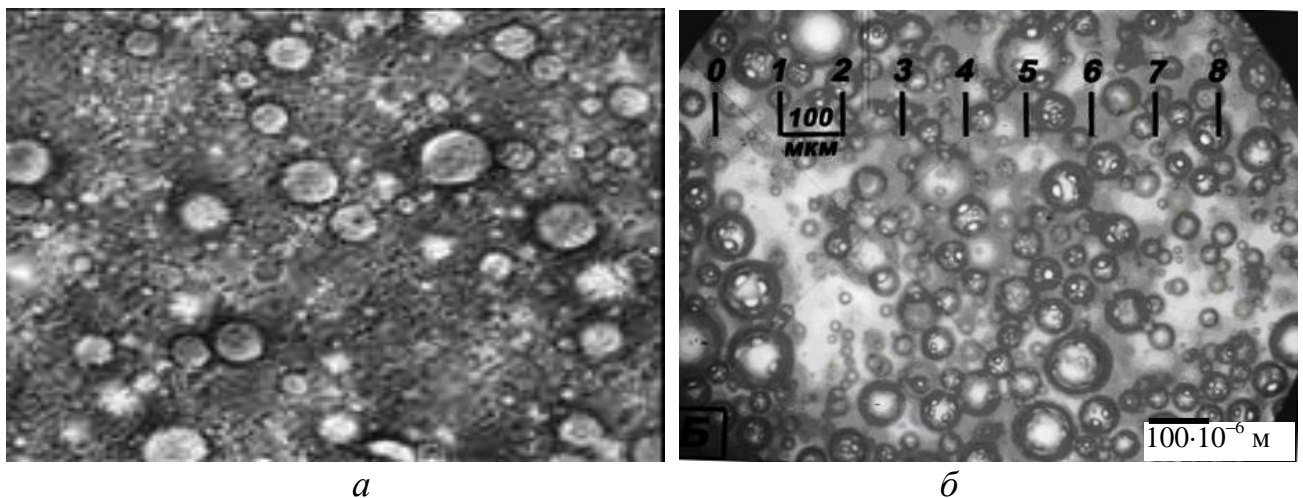


Рис. 5.25. Мікроструктура дослідних зразків сиркових десертів (збільшення в 400 разів): а – зразок 1 (контроль); б – зразок 3 з 0,15% ХДМ

Як видно з рис. 5.25, введення ХДМ сприяє збільшенню дисперсності (більш дрібних) повітряних пухирців і рівномірному розподілу їх по всьому

об'єму маси сиркового десерту порівняно з контролем. Результати розподілу пухирців повітря за діаметром наведено на рис. 5.26, звідки випливає, що введення ХДМ сприяє більш вузькому розподілу пухирців повітря за діаметром та стабілізації пінної структури.

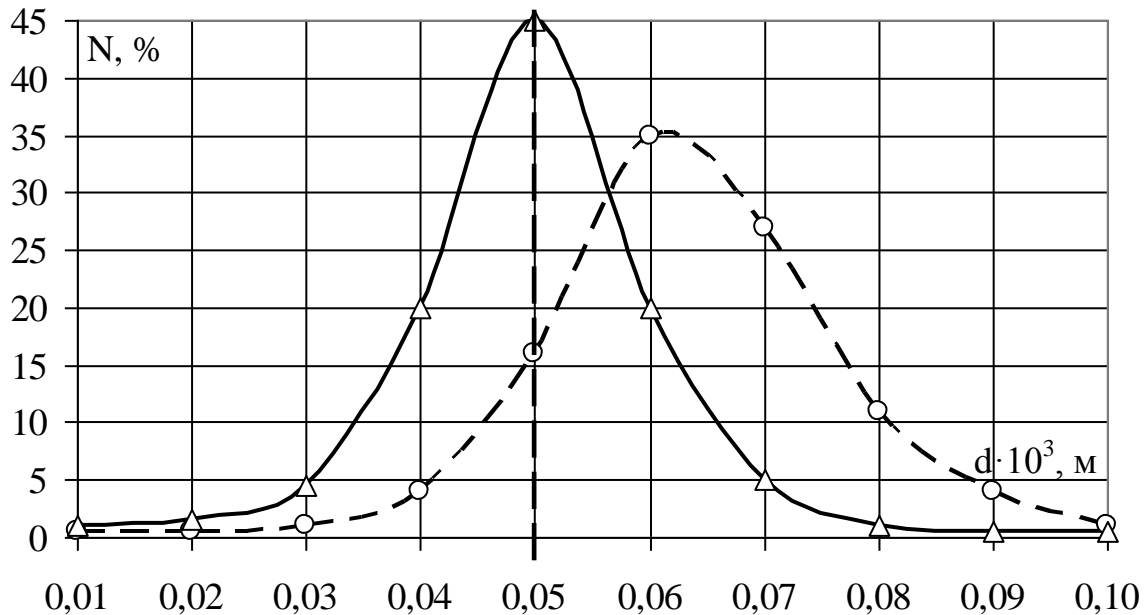


Рис. 5.26. Розподіл повітряних пухирців за діаметром у дослідних зразках десертів з сиру кисломолочного: контролю та «Слоненя» з 0,15% ХДМ: —○— — контроль, —△— — десерт «Слоненя»

Отже, функціональність ХДМ в цьому випадку ґрунтується, по-перше, на структуроутворювальній здатності НЧМ (за рахунок електростатичних і координаційних взаємодій з білковими молекулами), по-друге, на зниженні поверхневого натягу білків (за рахунок вияву НЧМ поверхнево-активної функції). Руйнування пін зумовлено процесами дифузії повітря і укрупненням пухирців через злиття, а ХДМ уповільнює ці процеси. Тому досить вузький пік функції розподілу пухирців повітря у дослідному зразку 3 вказує на рівномірну збитість пінної структури порівняно з контролем. Також через більшу в'язкість і менший за величиною поверхневий натяг піностійкість зразку 3 вище. Таким чином, введення ХДМ (у вигляді жирової суспензії) у кількості 0,15% від маси рецептурної суміші покращує органолептичні властивості, стабілізує пінну структуру сиркового десерту, у тому числі під час зберігання. Визначено раціональні параметри технологічного

процесу виготовлення сиркових десертів: перемішування ($n=2,0\dots2,2\text{ c}^{-1}$) 50 % сметани із жирною суспензією ХДМ протягом $(3\dots4)\times60\text{ c}$, витримка сметанно-оліє-магнетофудової суміші $\tau=(27\dots30)\times60\text{ c}$ з подальшим збиванням суміші ($n=5,8\dots6,0\text{ c}^{-1}$) протягом $(8\dots10)\times60\text{ c}$ та перемішуванням ($n=2,0\dots2,2\text{ c}^{-1}$) із сиром кисломолочним та збитою з цукровою пудрою сметаною протягом $(3\dots5)\times60\text{ c}$.

На підставі проведених досліджень розроблена рецептура і технологічна схема десерту із сиру кисломолочного з використанням ХДМ під назвою «Слоненя» [456, 458, 528] (табл. 5.22, рис. 5.27 та Додаток А. 20).

Підготовка сировини до виробництва сиркових десертів полягає в механічній обробці компонентів рецептури. Цукрову пудру просівають через сито з розмірами отворів не більше $1\cdot10^{-3}\text{ м}$. Сметану охолоджують до температури $(15\pm2)^\circ\text{C}$; 50% сметани від маси рецептурної суміші змішують ($n=2,0\dots2,2\text{ c}^{-1}$) з ЖС ХДМ протягом $(3\dots4)\times60\text{ c}$ і далі витримують суміш протягом $(27\dots30)\times60\text{ c}$ з подальшим збиванням протягом $\tau=(8\dots10)\times60\text{ c}$, $n=5,8\dots6,0\text{ c}^{-1}$. Підсистема В – «Приготування рецептурної суміші». Ця стадія передбачає такі технологічні операції: сметану збивають ($n=5,8\dots6,0\text{ c}^{-1}$) з цукровою пудрою протягом $(8\dots10)\times60\text{ c}$ до утворення пишної маси. За допомогою міксера змішують ($n=2,0\dots2,2\text{ c}^{-1}$) підготовлений сир, збиті сметану і сметанно-оліє-магнетофудову суміш протягом $(3\dots5)\times60\text{ c}$. Підсистема А – «Товарне оформлення і зберігання десерту». Десерт формують у вигляді піраміди й посипають цукровою пудрою. Оформлений десерт охолоджують до температури $(12\dots14)^\circ\text{C}$.

На новий продукт розроблена технологічна карта (Додаток Л.6), отримані патенти України на склад і спосіб виробництва (Додатки Б25, Б26), акти випуску дослідної партії в умовах ФО-П «Ведерников», м. Харків (Додаток Д.6), акти впровадження в навчальний процес (Додаток Р.7).

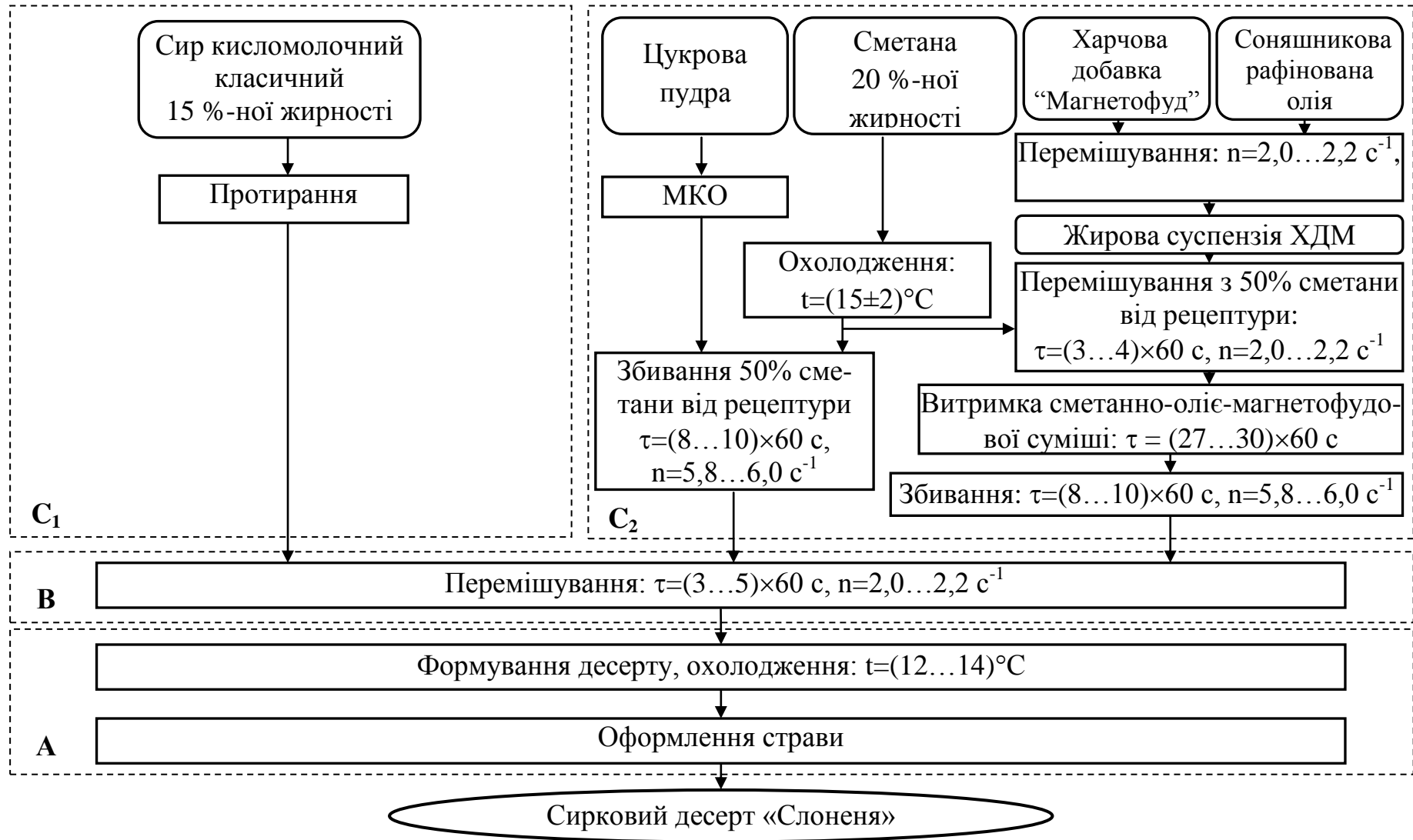


Рис. 5.27. Технологічна схема виготовлення десерту з сиру кисломолочного «Слоненя»:

А – товарне оформлення і зберігання; **В** – приготування рецептурної суміші; **С** – підготовка матеріалів та сировини до виробництва

Встановлено, що сирковий десерт «Слоненя» за показниками мікробіологічної безпеки, прийнятими для цієї групи кулінарної продукції, відповідає встановленим вимогам (табл. 5.24).

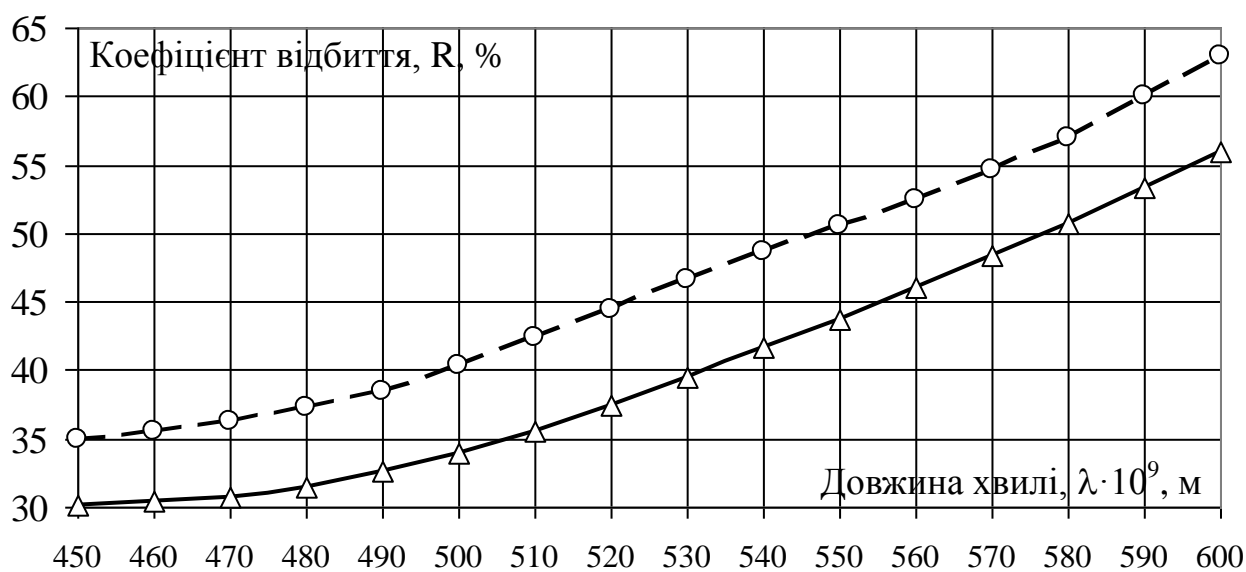
Таблиця 5.24

Мікробіологічні показники десерту «Слоненя»

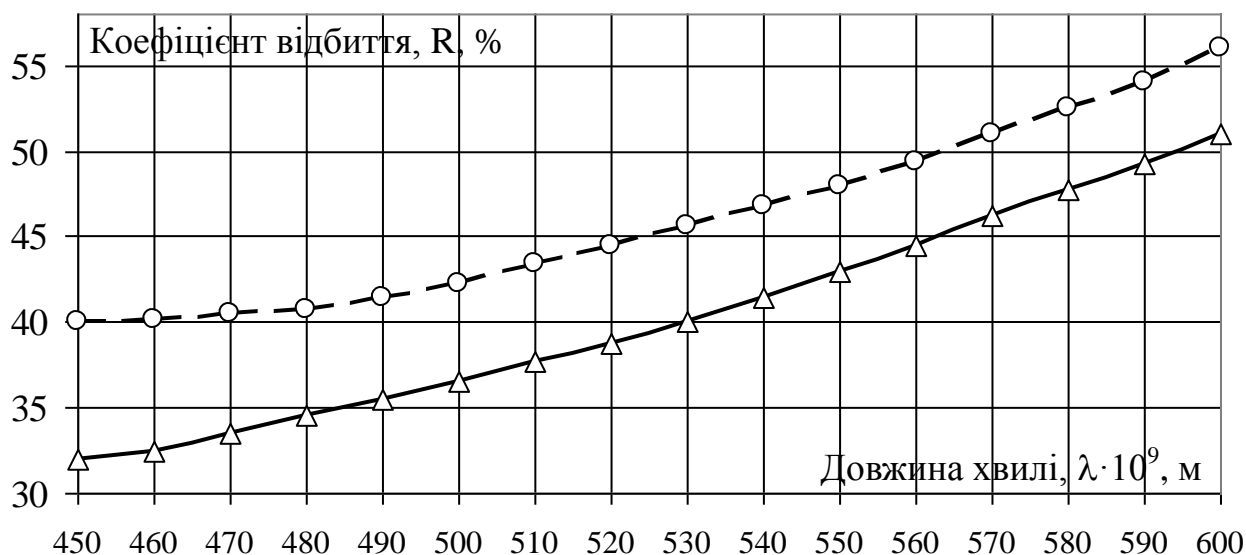
Найменування показника	Норматив	Фактичний вміст
КМАФАнМ, КУО/г	не більше 5×10^4	4×10^3
БГКП (коліформи)	не допускаються в 0,1 г	не виявлено в 0,1 г
<i>E. coli</i>	не допускаються в 1,0 г	не виявлено в 1,0 г
<i>S. aureus</i>	не допускається в 1,0 г	не виявлено в 1,0 г
Бактерії роду <i>Proteus</i>	не допускаються в 0,1 г	не виявлено в 0,1 г
Патогенні мікроорганізми, в тому числі бактерії роду <i>Salmonella</i>	не допускаються в 25,0 г	не виявлено в 25,0 г

ХДМ характеризується певним співвідношенням двовалентного – $(30,4 \pm 0,1)\%$ і тривалентного заліза – $(69,1 \pm 0,1)\%$, що є стабільним та зумовлює її кольоровофорвальну функцію – забарвлює продукти в кремово-червоно-коричневі кольори.

Тому проведено дослідження ремісійних характеристик сиркового десерту «Слоненя», який зберігався протягом 24 год (рис. 5.28).



а



б

Рис. 5.28. Ремісійні характеристики дослідних зразків сиркових десертів: а – безпосередньо після виготовлення; б – після 24 годин зберігання: : \circ – сирковий десерт без ХДМ – контроль, \triangle – сирковий десерт «Слоненя» з добавкою 0,15% ХДМ

Зі спектрів відображення рис. 6.6 видно, що колір продукту змінюється незначно. На ділянках довжини хвиль від 470 нм до 520 нм не спостерігається значної зміни кольору сиркового десерту «Слоненя», що повністю корелює з органолептичними показниками його якості. Причому, в області основної колірної гама ($\lambda > 500$ нм) криві відображення розташовані практично паралельно. Те саме можна сказати і щодо зразків після 24 год зберігання. Таким чином, кольороформування функція ХДМ досить стійка для такого виду десерту.

5.7. Технологія збитих десертів з використанням ХДМ

Виходячи зі сформованої седиментаційної стійкості водних суспензій ХДМ, схильності наночастинок харчової добавки «Магнетофуд» (НЧМ) до координаційних й електростатичних взаємодій та просторового структурування частинок суспензій, для рівномірного розподілу й

функціонування ХДМ за об'ємом поліфазної дисперсної системи НЧМ залучали до технології виробництва збитих десертів у вигляді суспензій на основі 5 % водного розчину желатину (див. п. 5.1) [262, 354, 402, 526]

Базовою для розробки нового виду збитих десертів обрані рецептури мусу «Журавлинний» № 898 та самбуку «Яблучний або сливовий» № 904 [524], у які вводили ХДМ у вигляді водної суспензії (ВС) на етапі розчинення желатину в кількості 2,0 г; 3,0 г; 4,0 г на 100 г рецептурної суміші, що дорівнює 0, 10%; 0,15 %; 0,20 % ХДМ від маси рецептурної суміші (табл. 5.25) [402, 526].

Таблиця 5.25

Рецептури ягідно-плодових мусів та самбуків, виготовлених за традиційною технологією (контроль), та мусів і самбуків з внесенням ХДМ

Найменування сировини	Витрати сировини на 100 г готової продукції, г (брутто)							
	Зразки мусу з ХДМ, %				Зразки самбуку з ХДМ, %			
	Зразок 1 – контроль	Зразок 2 – 0,1	Зразок 3 – 0,15	Зразок 4 – 0,2	Зразок 5 – контроль	Зразок 6 – 0,1	Зразок 7 – 0,15	Зразок 8 – 0,2
Малина	–	13,15	13,15	13,15	–	–	–	–
Полуниця	–	–	–	–	–	39,75	39,75	39,75
Смородина	–	3,29	3,29	3,29	–	9,94	9,94	9,94
Журавлина	26,3	2,63	2,63	2,63	–	–	–	–
*Яблуко	–	7,23	7,23	7,23	79,5	21,86	21,86	21,86
*Слива	–	–	–	–	72,2	7,95	7,95	7,95
Цукор-пісок	20,0	19,9	19,85	19,8	20,0	19,9	19,85	19,8
Яйця (білки)	–	–	–	–	4,8	4,8	4,8	4,8
Желатин	2,7	2,7	2,7	2,7	1,5	1,5	1,5	1,5
Вода (для желатину)	48,0	48,0	48,0	48,0	39,0	39,0	39,0	39,0
Водна суспензія ХДМ	–	2,0	3,0	4,0	–	2,0	3,0	4,0
Вихід готової страви	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Водну суспензію ХДМ додавали при розчиненні гелеутворювача $t=(60...65)^{\circ}\text{C}$, $\tau=(2-3)\times 60$ с при ретельному перемішуванні $n=2,0...2,2\text{c}^{-1}$. Розрахунок загальної органолептичної оцінки ягідно-плодових збитих

десертів (мусів і самбуків) з використанням ХДМ наведено в Додатку А.26. Результати органолептичної оцінки збитих десертів (мусів та самбуків) наведено в Додатках К.2, К.3, К.13, К.14 і на рис. 5.29.

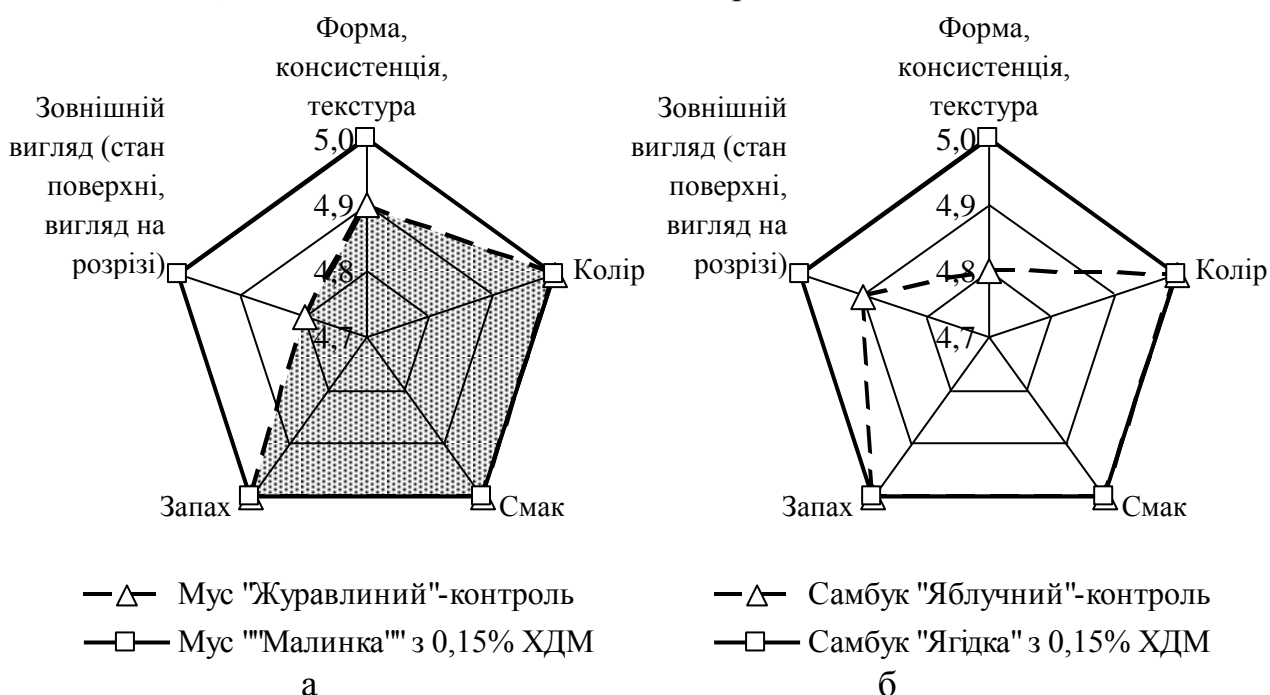


Рис. 5.29. Органолептичні показники якості ягідно-плодових збитих десертів: мусу «Малинка» (а) і самбуку «Ягідка» (б) порівняно з контролем

З рис. 5.29 видно, що більш високими показниками порівняно з контролем характеризувалися збиті десерти: мус «Малинка» і самбук «Ягідка» з внесенням 0,15% ХДМ від маси рецептурної суміші. Ці зразки мали однорідний, рівномірно рожевий або блідо-рожевий колір; м'яку, ніжну, однорідну консистенцію та дрібнопористу структуру; рівну без деформацій поверхню; приємний, виражений смак і запах, властивий використаній ягідно-плодовій сировині. Унаслідок органолептичного аналізу було визначено раціональний вміст ХДМ, який становив 0,15% від маси рецептурної суміші.

Для визначення технологічних параметрів виробництва збитих ягідно-плодових десертів досліджено вплив ХДМ на збитість та стабільність піни дослідних зразків мусів та самбуків (рис.5.30). Звідки випливає, що при введенні ХДМ в рецептуру збитих десертів збільшується піноутворювальна

здатність мусів в 1,22...1,3 раза і самбуків в 1,23...1,38 раза; стійкість піни в усіх дослідних зразках становить $(99\pm 1)\%$.

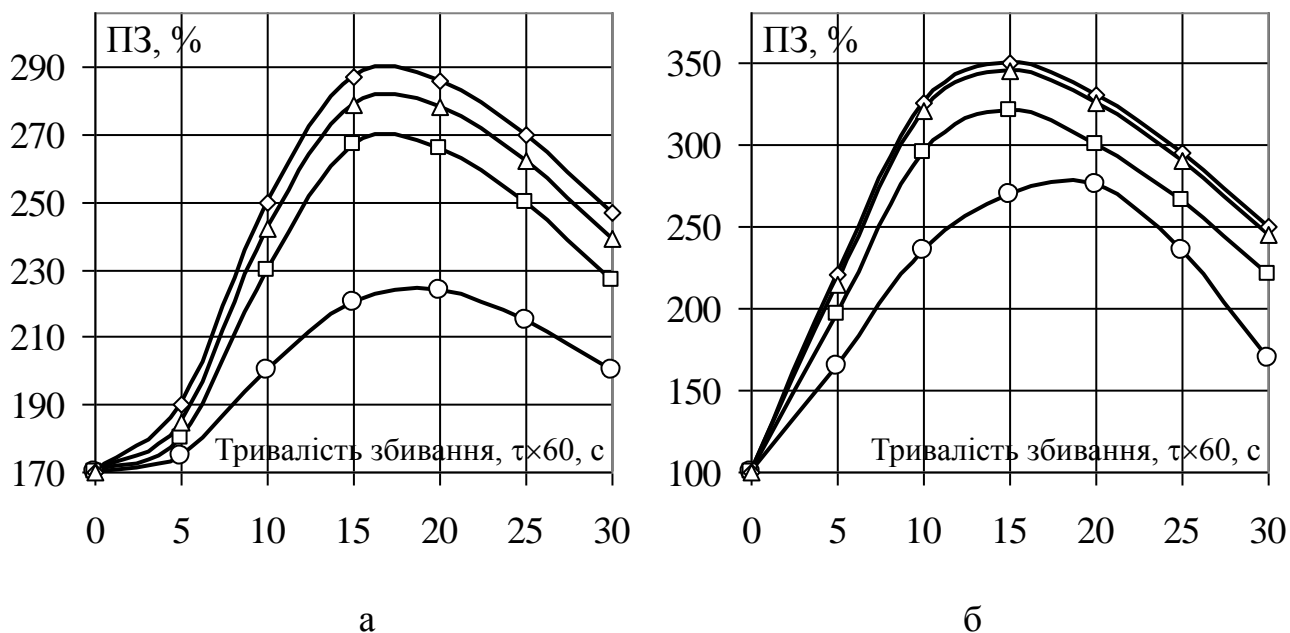


Рис. 5.30. Піноутворююча здатність дослідних зразків ягідно-плодових збитих десертів: а – муси; б – самбуки

Підвищення збитості плодово-ягідних десертів і стабілізація їх пінної структури здійснюється за рахунок формування стійкого просторового каркасу внаслідок магнетофудово-білково-вуглеводного комплексоутворення (за допомогою молекулярних та міжмолекулярних зв'язків), а також за рахунок перерозподілу вологи за формами зв'язку та змінам у просторовому зв'язку води в системі (завдяки високій водозв'язувальній і водоутримувальній здатності наночастинок ХДМ) [402, 526]. Таким чином, використання ХДМ у вигляді ВС дозволяє отримати пишну піну, ніжну масу та забезпечує їню стабільність.

Дослідження структурно-механічних показників, зокрема механічної міцності збитих десертів з використанням ХДМ під час зберігання (24 год) підтверджують дані досліджень збиття і стабільності їхніх пінних систем (рис. 5.31), звідки видно, що використання ХДМ зміцнює структуру пінних систем дослідних зразків мусу та самбуку в (1,21...1,25) раза порівняно з контролем.

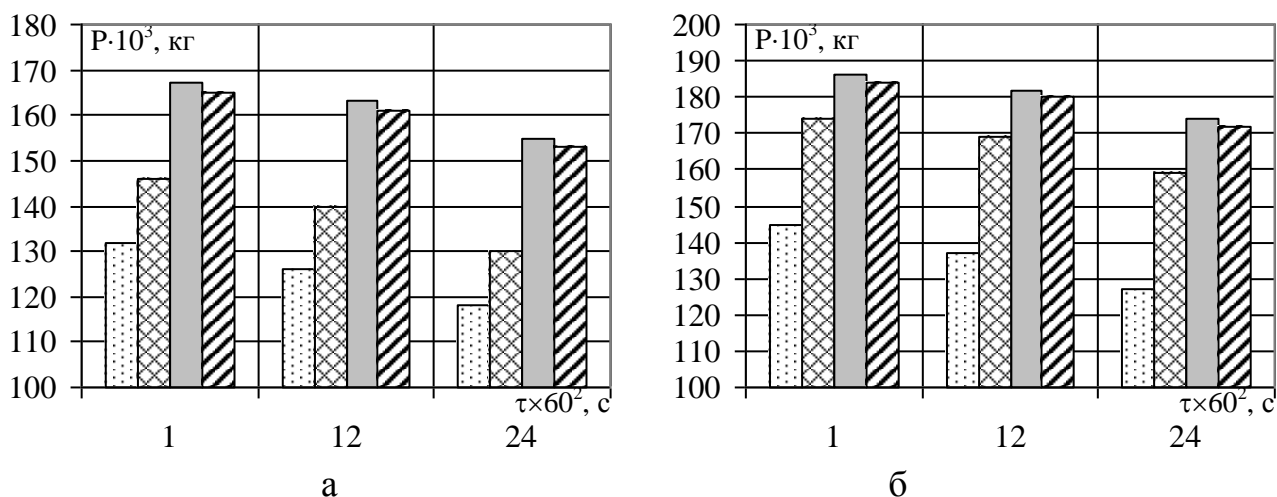


Рис. 5.31. Діаграми міцності дослідних зразків збитих десертів під час зберігання за температури (2–4)°С: а – для мусу (▨ – контроль – зразок 1; ▩ – зразок 2; ■ – зразок 3; ▨ – зразок 4), б – для самбуку (▨ – контроль – зразок 5; ▩ – зразок 6; ■ – зразок 7; ▨ – зразок 8)

Важливим аспектом страв з пінною структурою є дисперсність піни, яка забезпечує необхідну стабільність харчової текстури в часі. Результати мікроскопічних досліджень дослідних зразків 1, 3, 5, 7 та розподіл в них повітряних пухирців за діаметром представлені в Додатку А.27 та в [402, 526].

Дослідження дисперсності дозволили встановити, що пінна структура збитих десертів з додаванням ХДМ характеризується вузькою та симетричною функцією розподілу повітряних пухирців за діаметром; діаметр $d=(45...50) \cdot 10^{-3}$ м є панівним чинником, тобто НЧМ забезпечують стабільність піни [402, 526]. Тобто мус «Малинка» та самбук «Ягідка» з додаванням ХДМ мають більшу дисперсність та є більш стійкими до руйнування.

Установлено, що введення ХДМ підвищує ефективну в'язкість дослідних зразків мусів та самбуків в 1,3...1,4 раза і зменшує напруження зсуву в 1,2...1,25 раза, що покращує структуру збитих десертів (Додатки А.27, А.32) [402, 526].

Таким чином, дослідження структурно-механічних показників збитих десертних мас підтверджують стабілізацію їх структури ХДМ, а також доводять, що введення у рецептуру збитих десертів ХДМ (у вигляді водної суспензії) у кількості 0,15% до маси рецептурної суміші на етапі розчинення желатину дозволяє зменшити його кількість: на (5...7)% для мусу і на (9...11)% для самбуку.

За результатами проведених досліджень визначено раціональні параметри технологічного процесу виготовлення збитих ягідно-плодових десертів: внесення ХДМ у вигляді водної суспензії на етапі розчинення гелеутворювача при температурі $t=60\text{...}65^\circ\text{C}$ протягом $\tau=(2\text{...}3)\times 60\text{с}$ при ретельному перемішуванні $n=2\text{...}2,2\text{ с}^{-1}$ з подальшим збиванням харчової суміші мусу (самбуку) – ягідно-плодового пюре при температурі $t=15\text{...}18^\circ\text{C}$: протягом $\tau_1=(5\text{...}6)\times 60\text{с}$ при швидкості збивання $n_1=(2,0\text{...}2,2)\text{ с}^{-1}$; під час введення напівфабрикату «Розчин желатину з наночастинками ХДМ» (та яєчного білка – для самбуку «Ягідка») – $\tau_2=(3\text{...}4)\times 60\text{с}$, $n_2=(3,3\text{...}3,5)\text{ с}^{-1}$. Наприкінці – перемішування композиції протягом $\tau_3=(5\text{...}6)\times 60\text{с}$ при швидкості $n_1=(2,0\text{...}2,2)\text{ с}^{-1}$. На підставі проведених досліджень розроблені рецептури і технологічні схеми збитих ягідно-плодових десертів з використанням ХДМ у вигляді водної суспензії під назвами: «Малинка» (мус) та «Ягідка» (самбук) (рис. 5.32 та рис. 5.33 відповідно, Додаток А.30) [402, 526]. На нові збиті десертні страви розроблені технологічні карти (Додатки Л.7, Л.8), отримані патенти України (Додатки Б. 17, Б.18, Б. 27, Б.30), акти випуску дослідних партій в виробничих умовах (Додатки Д. 7, Д. 8) та акти впровадження (Додатки Р. 10, Р.12).

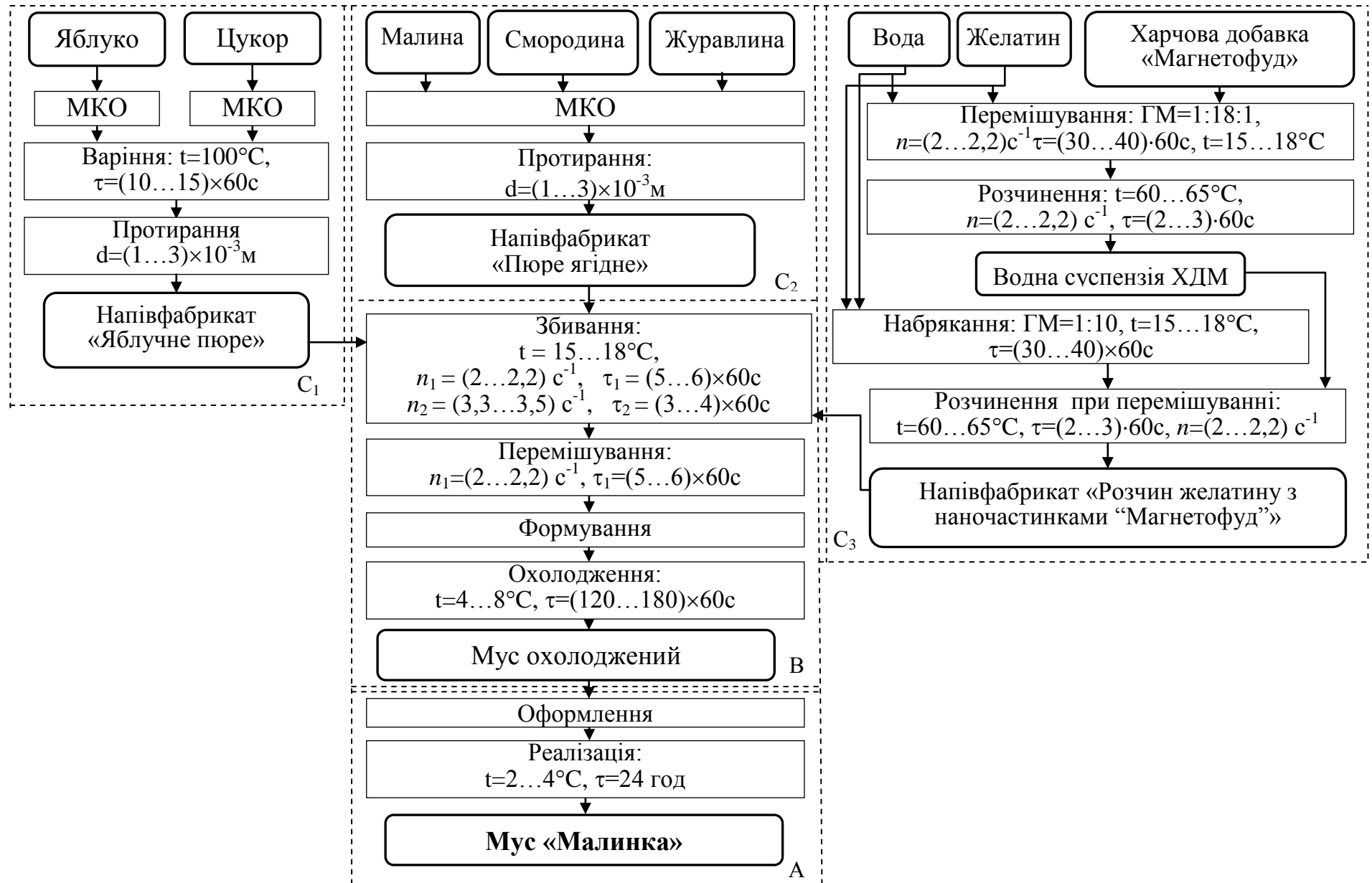


Рис. 5.32. Технологічна схема виготовлення збитого ягідно-плодового десерту – мусу «Малинка»: А – товарне оформлення і зберігання; В – приготування продукту; С₁, С₂, С₃ – підготовка матеріалів та сировини

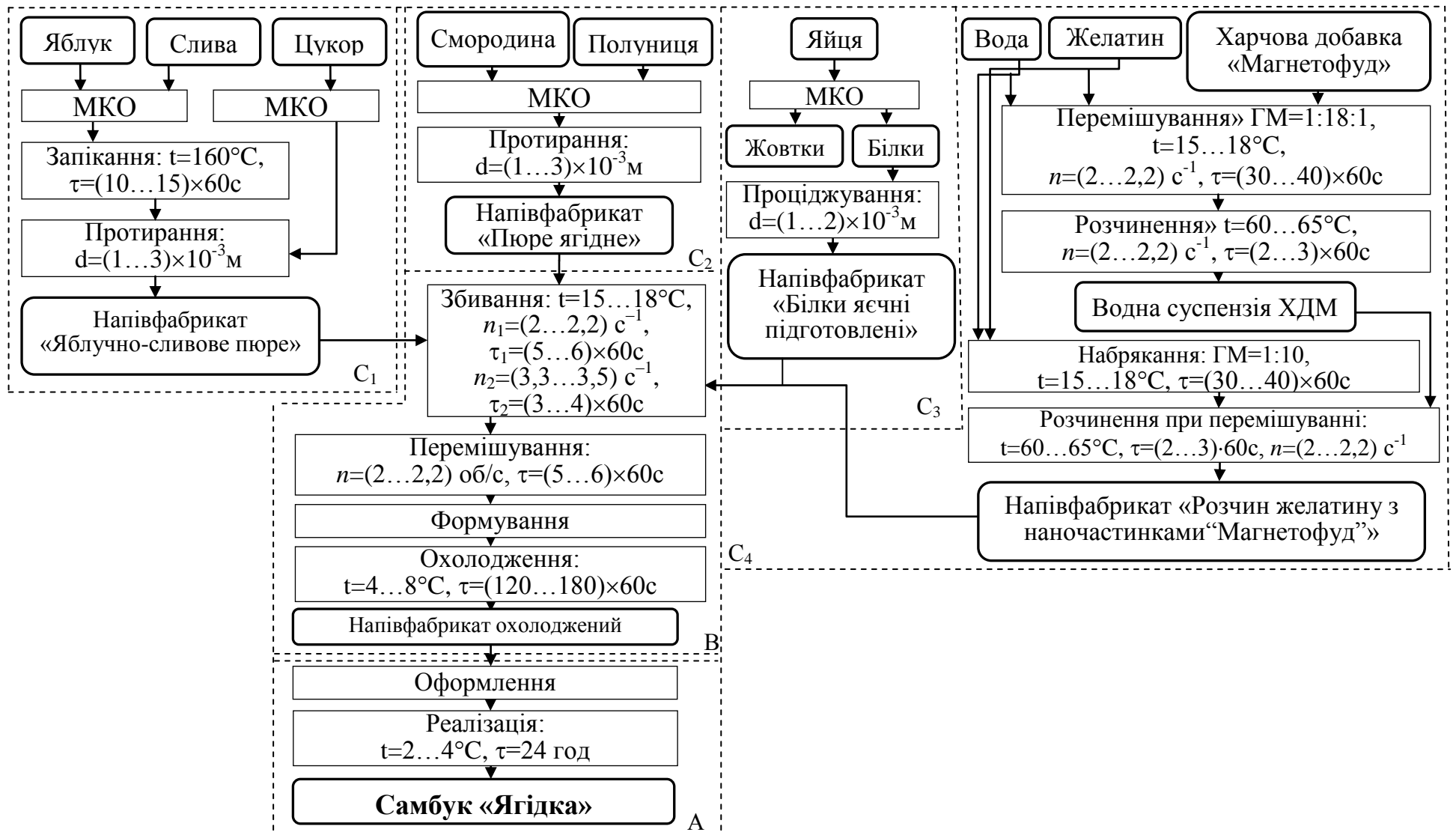


Рис. 5.33. Технологічна схема виготовлення збитого ягідно-плодового десерту – самбуку «Ягідка»: А – товарне оформлення і зберігання; В – приготування продукту; С₁, С₂, С₃, С₄ – підготовка матеріалів та сировини

5.8. Технологія мармеладно-пастильних виробів із введенням ХДМ

Як доведено у розділах 3 і 4, введення харчової добавки «Магнетофуд» (ХДМ) у кількості 0,10 %; 0,15 %; 0,20 % від маси сировини впливає на: седиментаційну стійкість, в'язкість, тиксотропні властивості водних суспензій, зокрема агару й пектину. Встановлений раціональний вміст ХДМ склав 0,15 % від маси сировини, що послугувало підґрунтям для введення цієї добавки у мармеладно-пастильні вироби у вигляді суспензій на основі 5% водного розчину гелеутворювача (агару, пектину) (п. 5.1). Крім того, масова частка внесення ХДМ обмежувалась її впливом на достатню функціональність та органолептичні властивості готових виробів.

5.8.1. Технологія мармеладу желейного формового з внесенням ХДМ

Базовою для розроблення рецептурної композиції нового продукту обрані рецептури формового желейного мармеладу на агарі № 11 і пектині № 49 [535], у які вводили ХДМ у вигляді ВС на етапі набрякання-розчинення у кількості 30,0 г на 1000 г рецептурної суміші, що дорівнює 0,15 % ХДМ від маси рецептурної суміші (табл. 5. 26) [453, 523, 527].

Таблиця 5.26

Рецептури мармеладу желейного формового на агарі і пектині, виготовленого за традиційною технологією (контроль), та мармеладу з внесенням ХДМ

Найменування сировини	Витрати сировини на 1000 г готової продукції, г			
	Дослідні зразки формового желейного мармеладу			
	На агарі		На пектині	
	Зразок 1 – контроль	Зразок 2 – з 0,15% ХДМ	Зразок 3 – контроль	Зразок 4 – з 0,15% ХДМ
1	2	3	4	5
Цукор-пісок для обсіпки	86,6	86,6	86,6	86,6
Цукор-пісок в желе	525,6	525,6	718,9	718,9

Продовження таблиці 5.26

1	2	3	4	5
Патока	262,7	262,7	–	–
Агар	10,5	10,5	–	–
Пектин	–	–	18,0	18,0
Кислота лимонна	11,8	11,8	12,0	12,0
Лактат натрію	–	–	10,0	10,0
Есенції різні	1,6	1,6	1,6	1,6
Барвники різні	0,5	0,5	0,6	0,6
Водна суспензія ХДМ	–	30,0	–	30,0
Вода	100,7	77,7	152,3	122,3
Вихід готового продукту	1000	1000	1000	1000

ВС додавали на етапі набрякання-розчинення драглеутворювача (агару або пектину), при цьому такі раціональні параметри утворення ВС такі: ГМ=1:18:1; $t_1=15...18^\circ\text{C}$; $n_1=2,0...2,2 \text{ c}^{-1}$; $\tau_1=(25...30)\times 60 \text{ с}$ для агару, $\tau_1=(35...40)\times 60 \text{ с}$ для пектину; $t_2=95...100^\circ\text{C}$ для агару, $t_2=85...90^\circ\text{C}$ для пектину; $n_2=2,0...2,2 \text{ c}^{-1}$; $\tau_2=(2...3)\times 60 \text{ с}$. для агара (і пектина). Розрахунок загальної органолептичної оцінки формового желейного мармеладу з ХДМ наведено в Додатку А.21. Результати органолептичної оцінки дослідних зразків формового желейного мармеладу наведені в Додатку А. 21 та на рис.5.34.

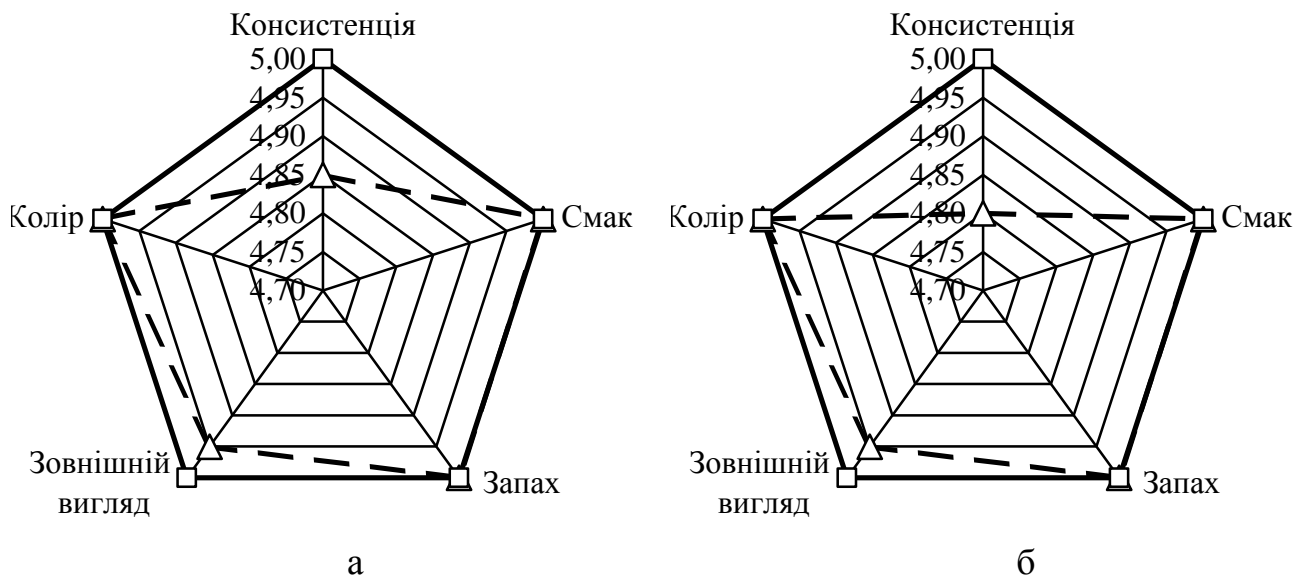


Рис. 5.34. Органолептичні показники дослідних зразків формового желейного мармеладу з 0,15% ХДМ з різними гелеутворювачами: а – на агарі; б – на пектині (—□— – зразок з 0,15% ХДМ, -△- – контроль - без ХДМ)

Як видно з рис. 5.34, найбільш високими показниками характеризувалися зразки 2, 4 – з 0,15% ХДМ порівняно з контролем. Вони мали коричнево-коньячний колір; однорідну, склоподібну, пружну консистенцію; правильну, без деформацій, з чітким контуром форму з гладкою, еластичною і сухою поверхнею; приємний виражений смак і запах, властивий мармеладу. Згідно з даними органолептичного аналізу, раціональний вміст ХДМ становить 0,15% від маси рецептурної суміші. Головна втрата вологи відбувається при відливанні й охолодженні мармеладних виробів, що позначається на якості готових виробів. Тому, важливими фізико-хімічними показниками формового желейного мармеладу є вологість і кислотність (табл.5.27).

Таблиця 5.27

Кислотність та вологість дослідних зразків формового желейного мармеладу з різними гелеутворювачами

Дослідні зразки формового желейного мармеладу	Фізико-хімічні показники			
	Масова частка вологи, %		Загальна кислотність, °	
	на агарі	на пектині	на агарі	на пектині
Зразок 1– контроль	16,2±0,6	–	18,3±0,8	–
Зразок 2	18,6±0,9	–	17,0±0,4	–
Зразок 3 –контроль	–	16,6±0,6	–	18,9±0,8
Зразок 4	–	18,8±0,9	–	17,6±0,4

Як видно з табл. 5.27, введення ХДМ у кількості 0,15% від маси рецептурної суміші збільшує вологість в 1,14...1,16 раза за рахунок вологозв'язувальної та вологоутримувальної здатності НЧМ; зменшує загальну кислотність в 1,06...1,1 раза через амфотерні властивості ХДМ та сорбцію кислотних речовин на НЧМ. Унаслідок цього основний гелеутворювальний компонент (агар, пектин тощо) в меншою мірою схильний до кислотного гідролізу, отже з'являється можливість вироблення мармеладу зниженої кислотності, який можна рекомендувати в лікувально-профілактичному харчуванні.

Попередніми дослідженнями доведено гелеутворювальну та тиксотропну дію НЧМ на різні технологічні (дисперсійні) середовища [402, 523, 524, 526, 530] (Додаток А. 32). На рис.5.35 наведено граничне напруження зсуву зразків гелеподібних мас.

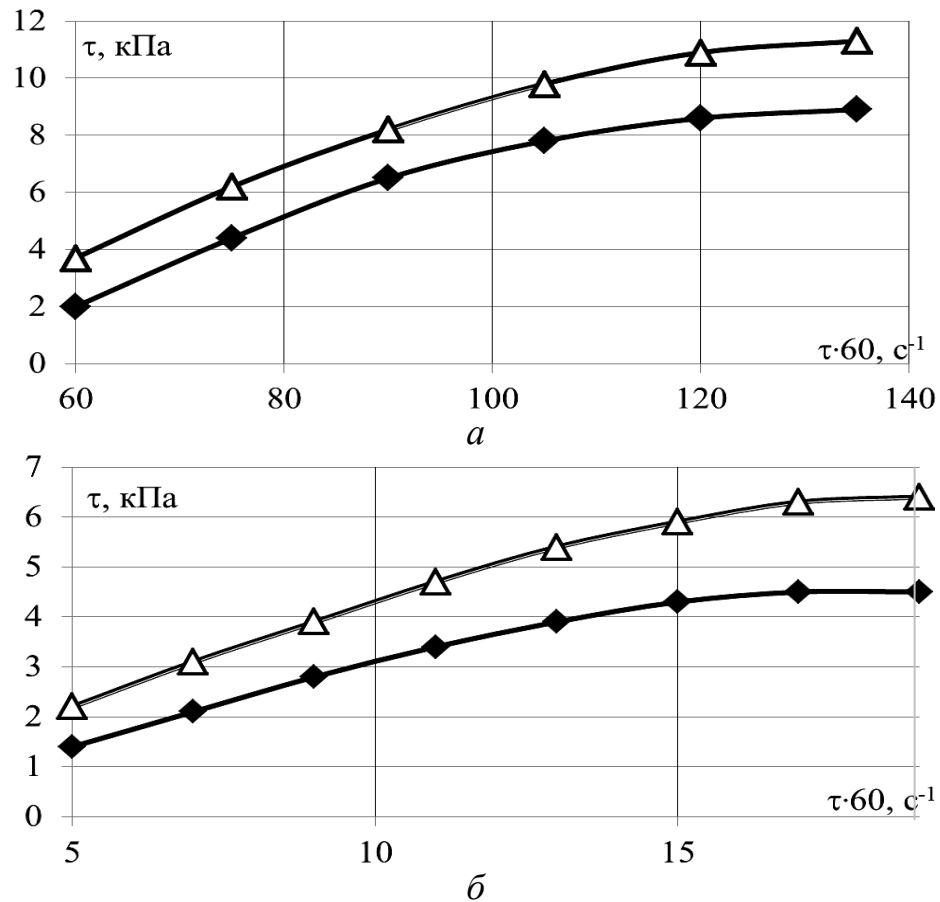


Рис. 5.35. Граничне напруження зсуву зразків гелеподібних мас при різних температурах з різними гелеутворювачами: *a* – на агарі; *б* – на пектині (—◆— – контроль – без ХДМ; —△— – зразок з 0,15 % ХДМ)

З рис. 5.35 видно, що внесення ХДМ сприяє підвищенню міцності студню в 1,3...1,5 раза порівняно з контролем (1, 3). В табл. 5.28 наведено швидкість структування дослідних зразків мармеладних мас, яку знаходили за формулою (5.1):

$$V_{стр} = \frac{\tau_{max} - \tau_0}{B_{стр}} \quad (5.1)$$

де τ_{max} – максимальне значення міцності, кПа;

τ_0 – вихідне значення міцності, кПа;

$B_{стр}$ – тривалість структування, $\tau \cdot 60$ с.

Встановлено, що внесення ХДМ (табл.5.28) приводить до збільшення швидкості структування мармеладних мас у середньому в 1,3...1,4 раза.

Швидкість структування дослідних зразків мармеладних мас

Дослідні зразки / Показники	τ_0 , кПа	τ_{\max} , кПа	t_{cmp} , $\tau \cdot 60c$	V_{cmp} , кПа/хв
Зразки мармеладних мас на агарі				
Зразок 1 – контроль	3,4±0,2	10,1±0,5	60,0±3	0,11±0,01
Зразок 2 з 0,15% ХДМ	4,4±0,2	11,9±0,6	60,0±3	0,19±0,01
Зразки мармеладних мас на пектині				
Зразок 3 – контроль	1,8±0,1	5,6±0,3	12,0±0,6	0,28±0,01
Зразок 4 з 0,15% ХДМ	2,8±0,1	7,2±0,4	12,0±0,6	0,47±0,02

Це пов'язано зі здатністю НЧМ до взаємодії з молекулами полісахаридів, що формує упорядкований просторовий каркас, який зміцнює гелеподібні структури. У результаті формується гарна текстура формового желейного мармеладу, що надає йому високих споживних властивостей і подовжує термін збереження його свіжості, зокрема, значно зменшується виділення вологи при зберіганні.

Таким чином, дослідження структурно-механічних показників мармеладних мас з різними гелеутворювачами підтверджують наукову концепцію роботи щодо стабілізації поліфазної структури наночастинками ХДМ. Крім того, введення у рецептуру формового желейного мармеладу ХДМ у кількості 0,15% до маси рецептурної суміші на етапі набрякання-розчинення гелеутворювача дозволяє зменшити кількість агару на 9...11% і пектину на 7...9% та сприяє підвищенню міцності желейно-мармеладного студню на (10±1)% для агару, на (8±1)% для пектину.

На підставі проведених досліджень складено рецептури і розроблено технологічні схеми мармеладу желейного формового з використанням ХДМ (у вигляді водної суспензії) під назвами: «Ранок» (на агарі) та «Веселка» (на пектині) [453, 523, 527], (Додаток А. 28). Отримані патенти України (Додатки Б.16, Б.23, Б. 28), акти виробничих відробок (П.6, П.7), акти випуску дослідних

партій (Додатки Д.9, Д.10), акти упровадження (Р.4, Р.5); розроблена та затверджена нормативна та технологічна документація (Ж.9, Ж.10, Ж.11, Ж.12

Під час виробництва підсистеми C_1 , C_2 , C_3 передбачають отримання базової суміші інгредієнтів, які потрібні для подальшого формування структури мармеладних виробів. Сипучі компоненти просіюють, есенцію, лимонну кислоту, барвник розчиняють, патоку крохмальну підігрівають та проціджують; отримують ВС ХДМ з подальшим додаванням у розчин гелеутворювача та витримкою суміші за температури $t=95...100^{\circ}\text{C}$ для агару, $t=85...90^{\circ}\text{C}$ для пектину; $n_2=2,0...2,2 \text{ c}^{-1}$; $\tau_2=(2...3)\times 60 \text{ c.}$ для агара (і пектина). При цьому збільшується розчинність гелеутворювача під дією наночастинок ХДМ завдяки водоутримувальній здатності і взаємодії її полярних наночастинок з полярними групами агару і пектину; при попередньому замочуванні (набряканні) гелеутворювача у холодній воді при температурі $15...18^{\circ}\text{C}$ протягом $(50...80)\cdot 60 \text{ c}$ – для агару та $(70...90)\cdot 60 \text{ c}$ – для пектину. Підсистема В – “Виробництво мармеладу желейного формового”: *приготування желейно-мармеладної маси*: після повного розчинення структуроутворювача додають рецептурну кількість цукру і патоки крохмальної (для мармеладу на агарі), необхідну для отримання желейної маси, і ретельно перемішують протягом $(20...25)\cdot 60\text{c}$ для агару і $(10...15)\cdot 60\text{c}$ для пектину, при нагріванні до температури $(95...100)^{\circ}\text{C}$ для агару і $(85...90)^{\circ}$ для пектину; при цьому в пектиново-цукровий сироп додатково додають лактат натрію. Після рівномірного розподілу сироп уварюють до масової частки сухих речовин $(75,0\pm 1) \%$ – для агару і $(76,5\pm 1) \%$ – для пектину; охолоджують до температури $(55...60)^{\circ}\text{C}$ – для агару і $(80...85)^{\circ}\text{C}$ – для пектину і проводять темперування, додаючи відповідно до рецептури розбавлені барвники, лимонну кислоту й есенцію при ретельному перемішуванні протягом $(5...7)\cdot 60\text{c}$. *Охолодження та структурування мармеладної маси*: отриману мармеладну масу розливають у

форми та охолоджують до температури (25...30) °С для структуроутворення. Сушіння формового желейного мармеладу проводять при температурі (52,5±2,5) °С протягом (6...8)·3600с – для агару та (4...6)·3600с – для пектину.

Підсистема А –“Товарне оформлення і зберігання мармеладу” – утворення готових мармеладних виробів, тобто отримання формового желейного мармеладу з визначеними властивостями, показниками якості та терміном зберігання.

Технологічні схеми виробництва формового желейного мармеладу “Ранок” (на агарі) та “Веселка” (на пектині) наведені відповідно на рис. 5.36 і рис. 5.37. На нові мармеладні вироби розроблено нормативна та технологічна документація (Додатки Ж.9, Ж.10, Ж.11, Ж.12); отримані патенти України (Додатки Б. 16, Б. 23, Б. 28), акти виробничих відробок (П.5, П.6), акти випуску дослідних партій (Додатки Д. 9, Д. 10), акт упровадження в умови ТОВ «Чарівна мозаїка» (Додаток Р.4).

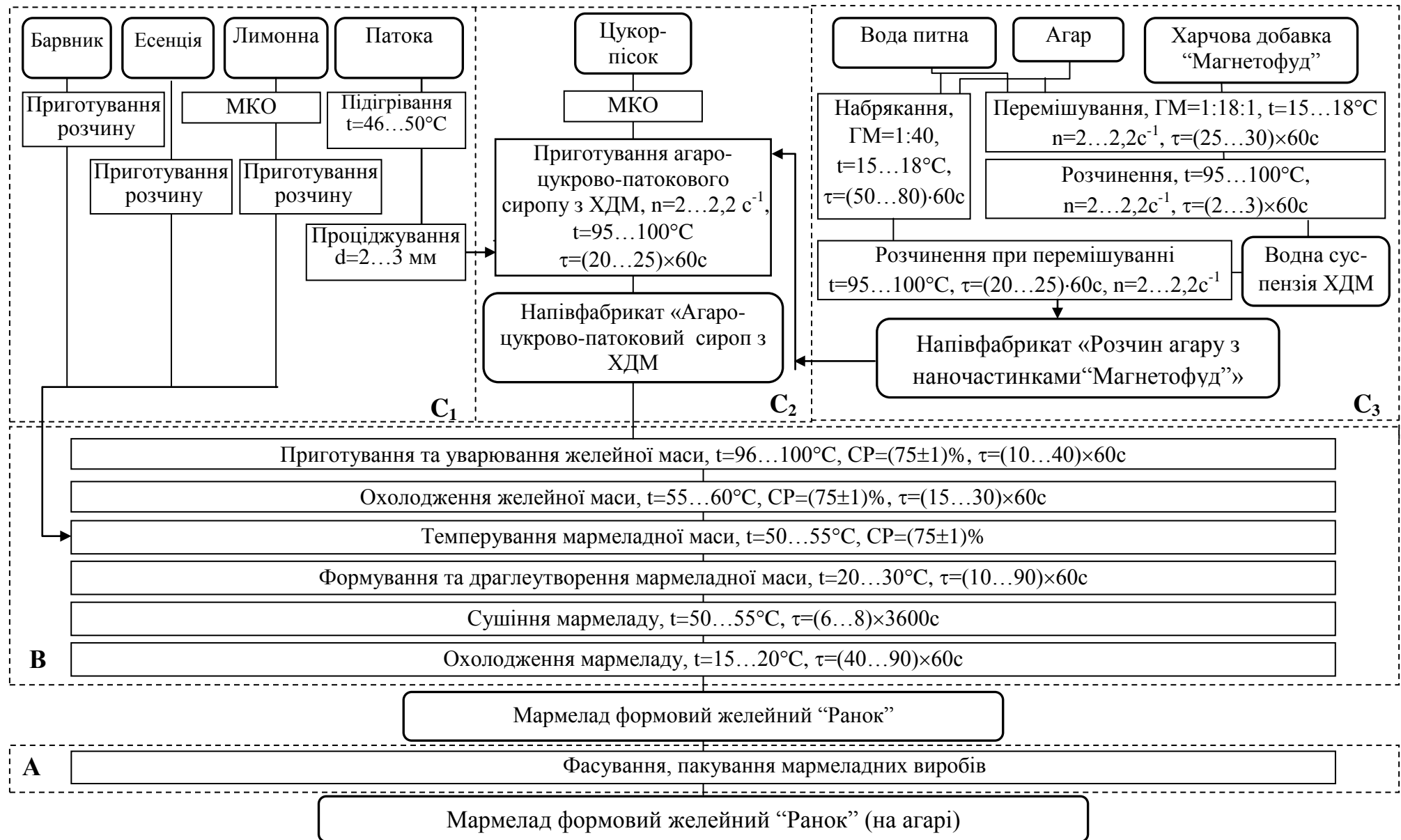


Рис. 5.36. Технологічна схема виробництва мармеладу желейного формового "Ранок" на агарі: **А** – товарне оформлення і зберігання; **В** – виробництво мармеладу; **C₁**, **C₂**, **C₃** – підготовка матеріалів та сировини до виробництва

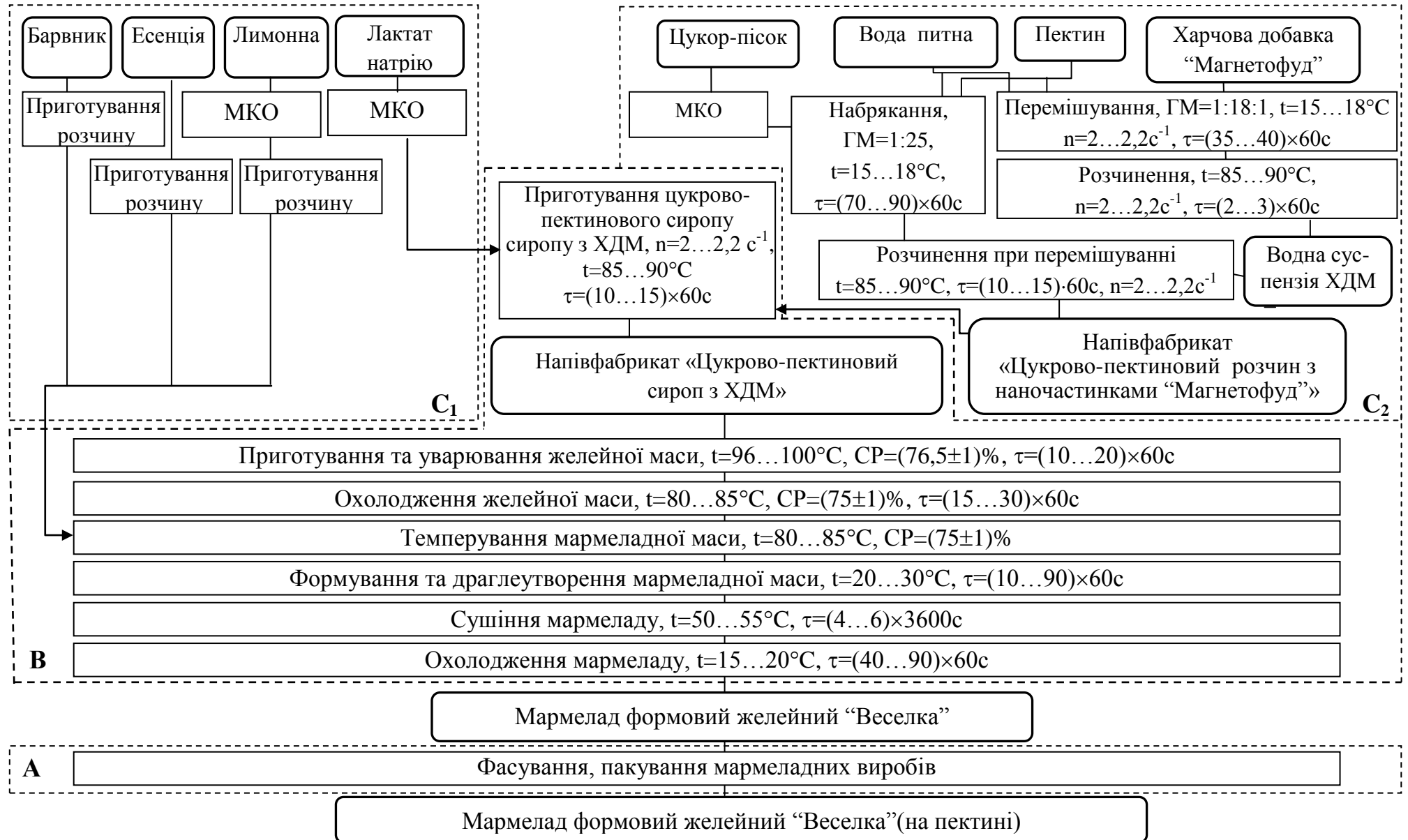


Рис. 5.37. Технологічна схема виробництва мармеладу желейного формового "Веселка" на пектині: **А** – товарне оформлення і зберігання; **В** – виробництво мармеладу; **С₁**, **С₂** – підготовка матеріалів та сировини до виробництва

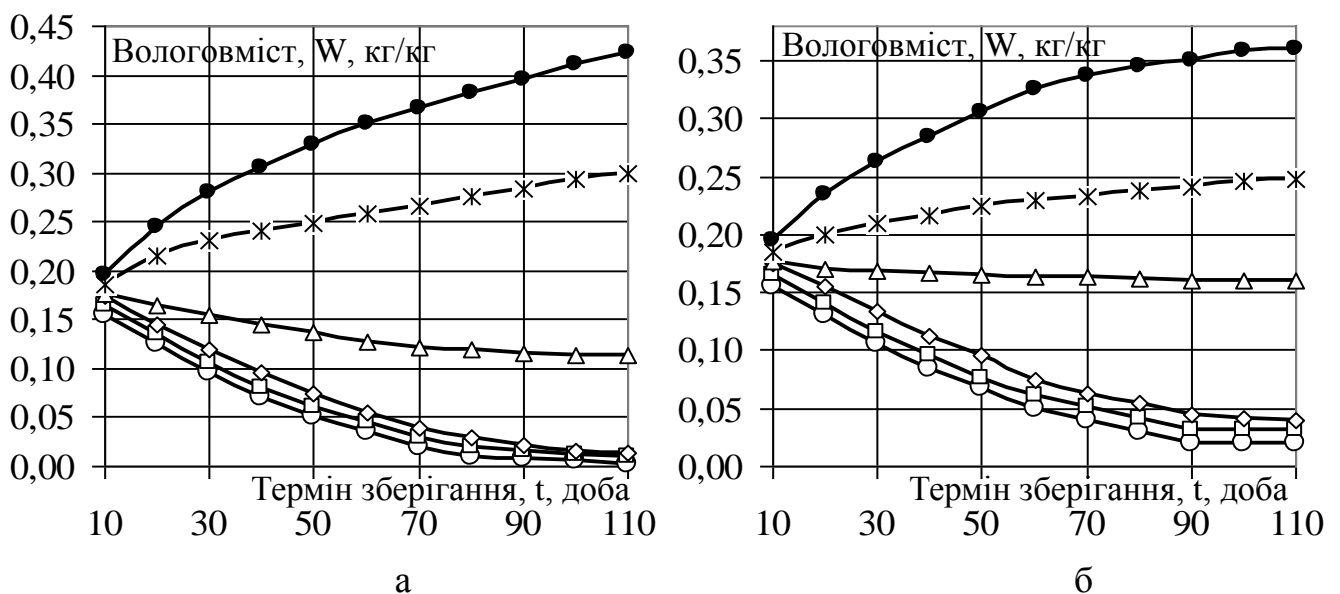
В табл. 5.30 наведено мікробна контамінація поверхні зразків формового желейного мармеладу “Ранок” та “Веселка” у процесі зберігання.

Таблиця 5.29

Мікробіологічні показники якості формового желейного мармеладу в процесі зберігання (відносна вологість повітря $\phi=(75\pm 2)\%$)

Найменування показників	Норматив	Дослідні зразки формового желейного мармеладу при	
		Мармелад на агарі “Ранок” з 0,15% ХДМ	Мармелад на пектині “Веселка” з 0,15% ХДМ
КМАФАнМ, КУО/г, через 90 діб	Не більше $1,0 \times 10^3$	$2,0 \times 10^2$	$3,0 \times 10^2$
Дріжджі КУО/г, через 90 діб	Не більше 50	18,0	19,0
БГКП (коліформи), через 90 діб	Не доз. в 0,1г	Не виявлено	Не виявлено
Патогенні м/о, у тому числі бактерії роду <i>Salmonella</i> , через 90 діб	Не доз. в 25,0 г	Не виявлено	Не виявлено
Плесняві гриби КУО/г, через 90 діб	Не більше 50	16,0	17,0

Як видно з табл. 5.29, мікробіологічні показники формового желейного мармеладу протягом регламентованого терміну зберігання (90 діб) відповідають нормативній документації, що свідчить про його високі санітарно-мікробіологічні характеристики. З метою визначення умов зберігання вивчено кінетику сорбції дослідних зразків формового желейного мармеладу “Ранок” та “Веселка” з використанням 0,15% ХДМ (рис. 5.38).



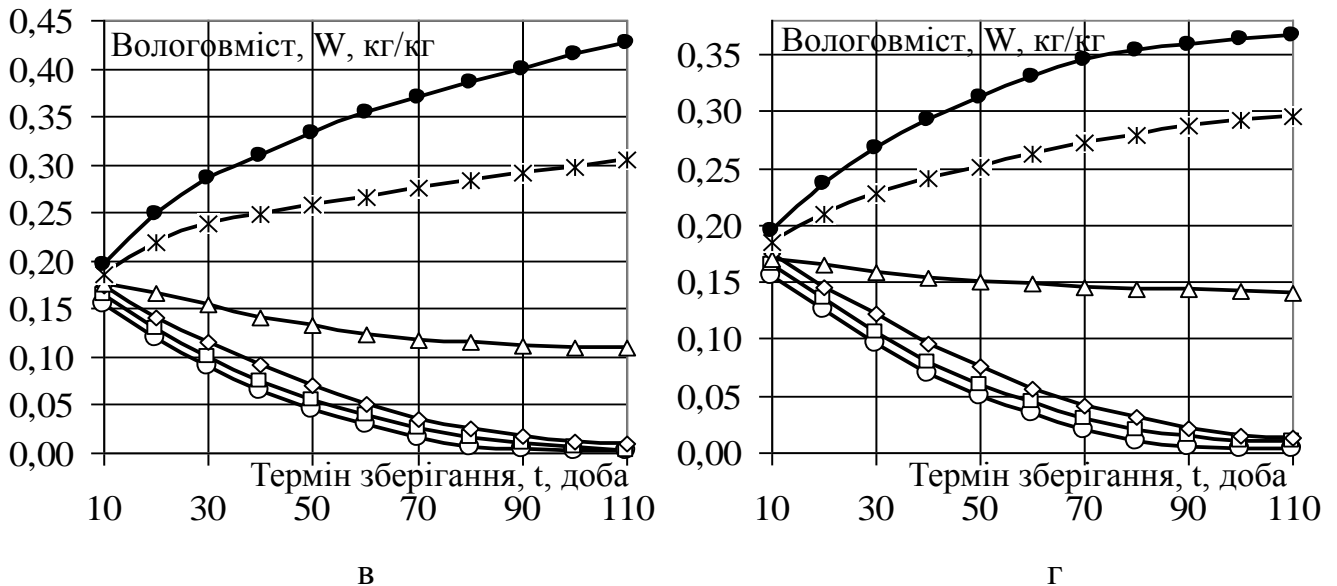


Рис. 5.38. Кінетика сорбції зразків формового желейного мармеладу за різної вологості повітря: *a* – контрольний зразок 1 мармеладу на агарі; *б* – зразок 2 мармеладу «Ранок» на агарі (з 0,15% ХДМ); *в* – контрольний зразок 3 мармеладу на пектині; *г* – зразок 4 мармеладу «Веселка» на пектині (з 0,15% ХДМ) (—○— – 40%, —□— – 50%, —◇— – 60%, —△— – 70%, —*— – 80%, —●— – 90%)

Як видно з кривих сорбції (рис. 5.38), за відносної вологості повітря $\varphi=(70-80)$ % протягом рекомендованих строків зберігання (3 місяці) в усіх дослідних зразках мармеладу зміна вологовмісту відбувається повільно. При $\varphi=(75\pm 2)$ % додавання ХДМ сприяє уповільненню втрати вологи на 11...18% порівняно з контролем; зразки мармеладу характеризуються постійним вологовмістом протягом усього терміну зберігання. При $\varphi=(90\pm 2)$ % вологовміст мармеладу поступово зростає. За вологості повітря менше за (70 ± 2) % криві сорбції спрямовані вниз, що характеризує зменшення вологовмісту, поступове висихання продукту і призводить до втрати органолептичних властивостей: зміни форми, структури, твердіння консистенції. При порівнянні з контрольними зразками 1, 3 видно, що швидкість зміни вологовмісту в дослідних зразках 2, 4 зменшується, що пов'язано зі здатністю НЧМ зв'язувати та утримувати вологу через створення комплексів з водою і макромолекулами

полісахаридів, зокрема агару, пектину [523, 527]. Результати обчислення критерію Q для зразків мармеладу подано в табл. 5.30.

Таблиця 5.30

Критерій Q для формового желейного мармеладу “Ранок”(зразок 2) та “Веселка” (зразок 4) порівняно з контролем (1, 3) за заданої вологості оточуючого середовища (ϕ)

Вологовміст оточуючого середовища, ϕ , %	Значення критерію Q для дослідних зразків мармеладу			
	Зразок 1 – контроль	Зразок 3 – мармелад “Ранок”	Зразок 5 – контроль	Зразок 7 – мармелад “Веселка”
40	1,405	1,257	1,422	1,407
50	1,304	1,139	1,359	1,309
60	1,1079	0,990	1,236	1,189
70	0,490	0,480	0,521	0,319
80	0,876	0,492	0,879	0,824
90	1,679	1,378	1,744	1,400

Аналіз критерію Q (табл. 5.30) встановлює найменшу сумарну величину відхилення вологовмісту (W_i) дослідних зразків формового желейного мармеладу від нормативного значення $W_3 = 0,180$ кг/кг – при $\phi=(70\pm 2)$ %, що є додатковим підтвердженням оптимальних умов температурно-вологісного режиму під час зберігання формового желейного мармеладу, знайдених з кінетичних кривих сорбції (рис. 5.38): вологість повітря $\phi=(75\pm 2)$ %, температура (18 ± 2) °C.

5.8.2. Технологія зефіру біло-рожевого з використанням ХДМ

Базовими для розроблення рецептурної композиції нового продукту обрані рецептури біло-рожевого зефіру на агарі № 95 і пектині № 126 [535], в які вводили ХДМ у вигляді ВС при набряканні-розчиненні гелеутворювача у

кількості 30,0 г на 1000 г рецептурної суміші, що дорівнює 0,15% ХДМ від маси рецептурної суміші (табл. 5. 31) [263, 529].

Таблиця 5.31

Рецептури зефіру біло-рожевого на агарі і пектині, виготовленого за традиційною технологією (контроль), та зефіру з внесенням ХДМ

Найменування сировини	Витрати сировини на 1000 г готової продукції, г			
	Дослідні зразки зефіру біло-рожевого			
	На агарі		На пектині	
	Зразок 1 – контроль	Зразок 2 – дослід з 0,15 % ХДМ	Зразок 3 – контроль	Зразок 4 – дослід з 0,15 % ХДМ
1	2	3	4	5
Цукор-пісок	673,0	673,0	671,0	671,0
Цукрова пудра	29,9	29,9	29,9	29,9
Патока	139,4	139,4	142,9	142,9
Пюре яблучне	390,0	390,0	298,0	298,0
Білок яечний	65,0	65,0	65,0	65,0
Агар	8,6	8,6	–	–
Пектин яблучний	–	–	13,4	13,4
Кислота молочна	6,7	6,7	8,4	8,4
Лактат натрію	–	–	6,8	6,8
Есенції різні	2,0	2,0	2,0	2,0
Барвник червоний	0,6	0,6	0,6	0,6
Водна суспензія ХДМ	–	30,0	–	30,0
Вихід готового продукту	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0

ВС ХДМ додавали при набряканні-розчиненні гелеутворювача. Розрахунок загальної органолептичної оцінки зефіру біло-рожевого з ХДМ наведено в Додатку А. 22. Результати органолептичної оцінки дослідних зразків зефіру біло-рожевого наведені в Додатку А. 22 та на рис.5.39, звідки видно, що введення 0,15% ХДМ підвищує органолептичні показники продукту порівняно з контролем: зефір – однорідний, рівномірно білий із кремовим відтінком та світло-рожевим кольором має м'яку, однорідну консистенцію та дрібнопористу структуру; округлу, без деформацій, з чітким контуром форму та рівну, без

пошкоджень і затвердінь на гранях поверхню; приємний виражений смак і запах, властивий зефіру.

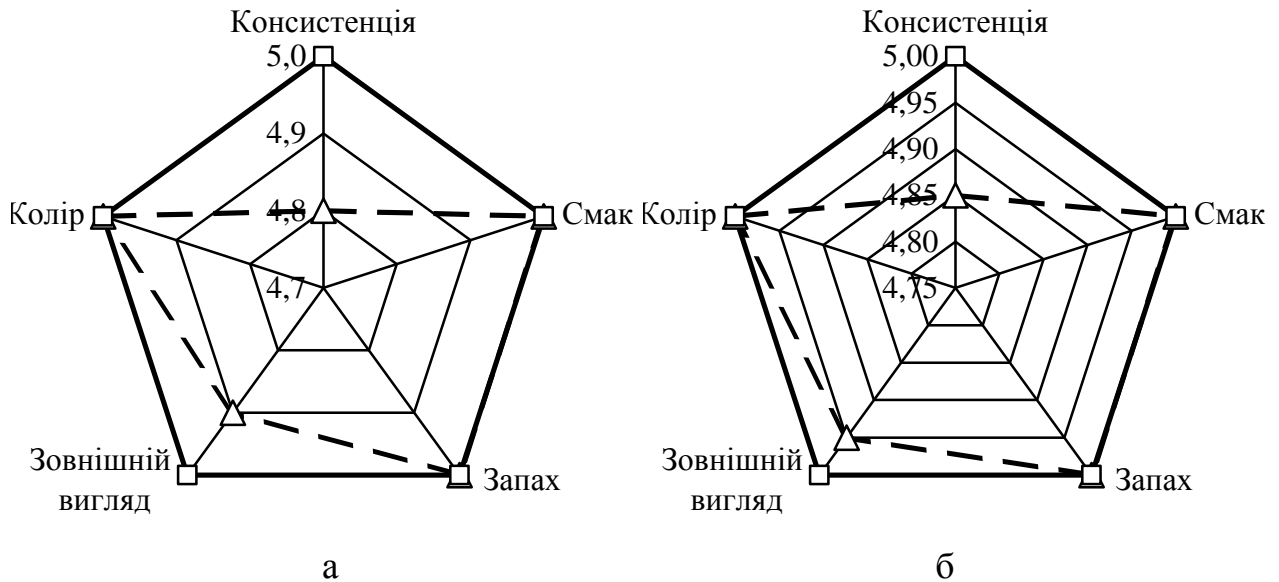


Рис. 5.39. Органолептичні показники дослідних зразків зефіру біло-рожевого з різними гелеутворювачами у порівнянні з контрольними зразками: *а* – на агарі; *б* – на пектині (—□— – зразок з 0,15% ХДМ, -△- – контроль - без ХДМ)

Згідно з даними органолептичного аналізу раціональний вміст ХДМ становить 0,15% від маси рецептурної суміші, що підтверджено дослідженнями піноутворювальної здатності і піностійкості яєчного білка на модельних системах з різними гелеутворювачами та з різною кількістю ХДМ (розділ 4) з використанням математичного моделювання [263] та Додаток А. 31. В таблиці 5.32 наведені основні фізико-хімічні та технологічні показники дослідних зразків зефіру біло-рожевого з різними гелеутворювачами.

Таблиця 5.32

Фізико-хімічні та технологічні показники дослідних зразків зефіру біло-рожевого

Найменування показника	Дослідні зразки зефіру біло-рожевого			
	На агарі		На пектині	
	Зразок 1 – контроль	Зразок 2 – з 0,15% ХД	Зразок 3 – контроль	Зразок 4 – з 0,15% ХДМ
1	2	3	4	5
Масова частка вологи,%	17,0±0,8	17,4±0,8	17,0±0,8	17,5±0,8

Продовження таблиці 5.32

1	2	3	4	5
Загальна кислотність, град.	0,7±0,03	0,6±0,02	5,90±0,3	5,30±0,2
Густина, кг/м ³ (найменше значення)	545±12	485±8	550±12	480±8
Тривалість збивання, τ·60с	16,0	14,0	10,0	8,0
Міцність, кПа	9,0±0,5	10,8±0,6	6,5±0,3	7,4±0,4

З даних табл. 5.32 видно, що при введенні ХДМ зменшується густина в (1,12...1,15) раза і тривалість збивання на (1,5...2,5)×60 с за рахунок взаємодії НЧМ з молекулами яєчного білка, що сприяє розгалуженню головних ланцюгів його макромолекул в дисперсійному середовищі та сповільнює процес витікання рідини і тоншання стінок повітряних пухирців.

Також використання ХДМ збільшує міцність пінної структури в (1,1...1,2) раза за рахунок «кластерофільності» наночастинок ХДМ, що підвищує в'язкість гелеутворювача в каналах Гіббса-Плато, уповільнюючи процес синерезису і стабілізуючи гелевий каркас пінної структури. В табл. 5.33 наведено кінетику об'єму дослідних зразків зефірних мас при зберіганні протягом регламентованого терміну – 60 діб.

Таблиця 5.33

Кінетика об'єму дослідних зразків зефірних мас при зберіганні

Термін зберігання, доба	Об'єм дослідних зразків зефірних мас, см ³			
	На агарі		На агарі	
	Зразок 1 – контроль	Зразок 2 – з 0,15% ХДМ	Зразок 3 – контроль	Зразок 4 – з 0,15% ХДМ
0	100±5	100±5	100±5	100±5
20	81,7±4	98,2±5	80,4±4	97,2±5
40	76,4±3	93,6±5	75,2±3	92,8±5
60	68,2±2	86,8±4	67,0±3	85,6±5

З даних табл. 5.33 видно, що при введенні ХДМ спостерігається ефект стабілізації структури дослідних зразків зефірних мас за рахунок покращення піноутворення і фіксації повітряних пухирців в системі під дією НЧМ.

З мікроскопічних досліджень дослідних зразків збивних мас (Додаток А. 23) та розподілу пухирців повітря за діаметром (рис.5.40) видно, що використання ХДМ сприяє зростанню дисперсності пухирців повітря та їх більш вузькому розподілу за діаметром порівняно з контролем.

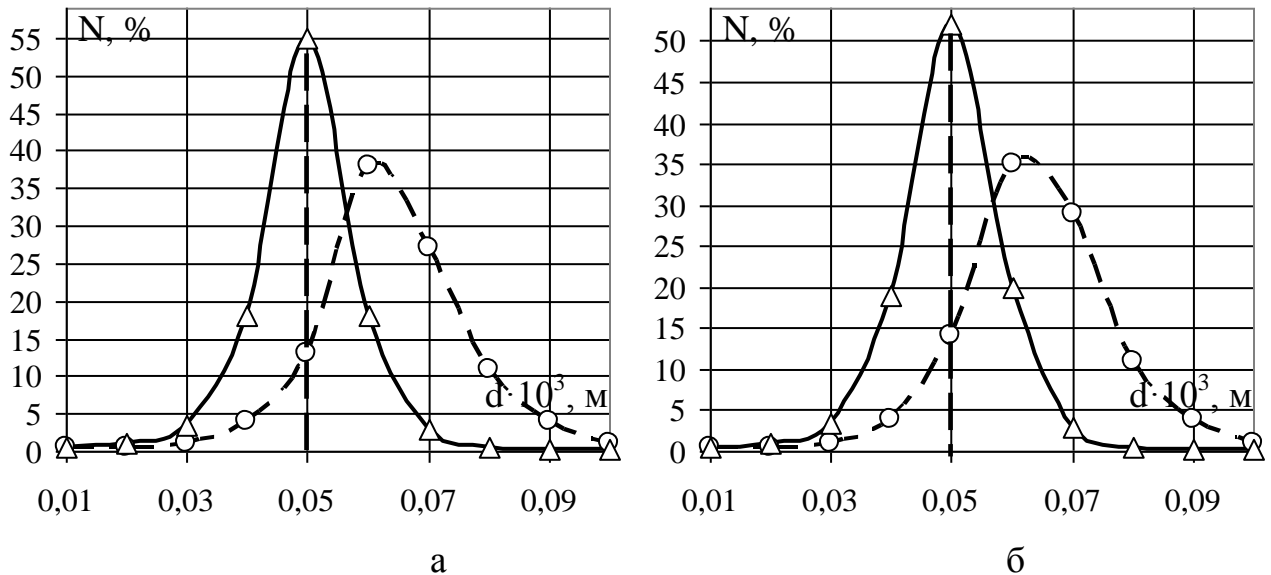


Рис. 5.40. Розподіл повітряних пухирців за діаметром у зразках збивних мас з різними гелеутворювачами: а – на агарі (—○— – контроль, —△— – зефир «Весна» на агарі з 0,15% ХДМ), б – на пектині (—○— – контроль, —△— – зефир «Літо» на пектині з 0,15% ХДМ)

Функціональність ХДМ в цьому випадку впливаю передусім на зниження поверхневого натягу (розділ 3). Руйнування піни зумовлено процесами дифузії повітря, стіканням рідини зі стінок пухирців (в'язкістю рідини) і укрупненням пухирців через злиття. Досить вузький пік, як для контролю, так і для дослідних зразків (2, 4) з 0,15% ХДМ вказує на рівномірну збитість зефирної маси. Причому через більшу в'язкість і менший за величиною поверхневий натяг піностійкість в дослідних зразках з ХДМ є вищою. Тобто введення ХДМ у кількості 0,15% від маси рецептурної суміші у вигляді суспензії на основі 5% водного розчину пектину або агару стабілізує пінну структуру зефирних мас, у тому числі протягом встановлених регламентом термінів зберігання. Вивчено в'язкість та механічну міцність дослідних зразків зефиру. Після формування збивної маси відбувається

поступове фіксування каркасу, оскільки рідкі плівки, що розділяють пухирці повітря, містять гелеутворювач, який забезпечує процес переходу маси в гелеподібний стан. На рис. 5.41 наведена міцність (τ , кПа) дослідних зразків зефірних мас в процесі вистойки ($\tau \times 60$ с).

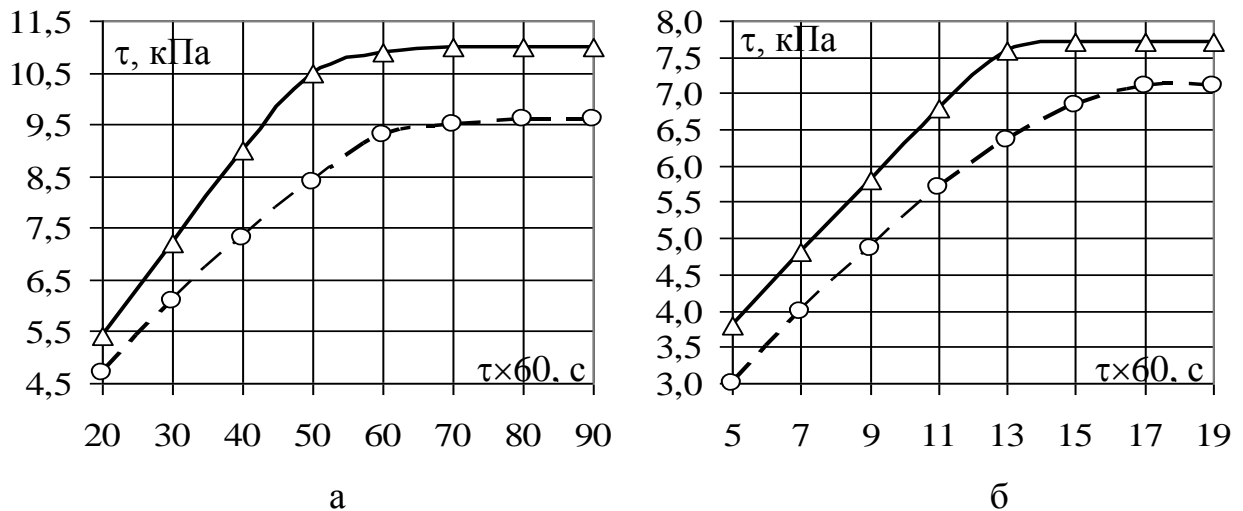


Рис. 5.41. Залежність міцності від тривалості вистойки дослідних зразків збивних мас: а – на агарі (—○— – зразок 1 - контроль, —△— – зразок 2 з 0,15% ХДМ); б – на пектині (—○— – зразок 3 - контроль, —△— – зразок 4 з 0,15% ХДМ)

З рис. 5.41 видно, що введення ХДМ прискорює процес гелеутворення на $(2,0 \dots 2,5) \times 60$ с на агарі і на $(2,0 \dots 2,2) \times 60$ с – на пектині; збільшує максимальне напруження зсуву на $(11,9 \dots 12,6)\%$ – на агарі і на $(8,2 \dots 9,1)\%$ – на пектині, що пов'язано з утворенням супрамолекулярних асоціатів з наночастинками добавки. У результаті процес драглеутворення прискорюється і міцність збивної маси збільшується.

Важливою реологічною характеристикою збивних мас є в'язкість. Її зміна викликає зміну коагуляційно-кристалізаційної структури піни, тим самим впливаючи на в'язкість маси. На рис. 5.42 наведено ефективна в'язкість (η , кПа) дослідних зразків зефірних мас залежно від градієнта швидкості зсуву (γ , с^{-1}), звідки видно, що введення в рецептурний склад ХДМ сприяє збільшенню ефективної в'язкості зефірних мас в $1,35 \dots 1,55$ раза порівняно з контролем.

Збільшення в'язкості пов'язано зі гелеутворювальною дією НЧМ, що приводить до агрегації полісахаридів і підвищення шорсткості їх каналів, унаслідок чого зростає стійкість пінних плівок, а підвищення драглеутворюючої здатності пектину й агару дозволяє підвищити в'язкість у каналах Гіббса-Плато, що стабілізує гелевий каркас пінної структури й уповільнює процес синерезиса [263, 529].

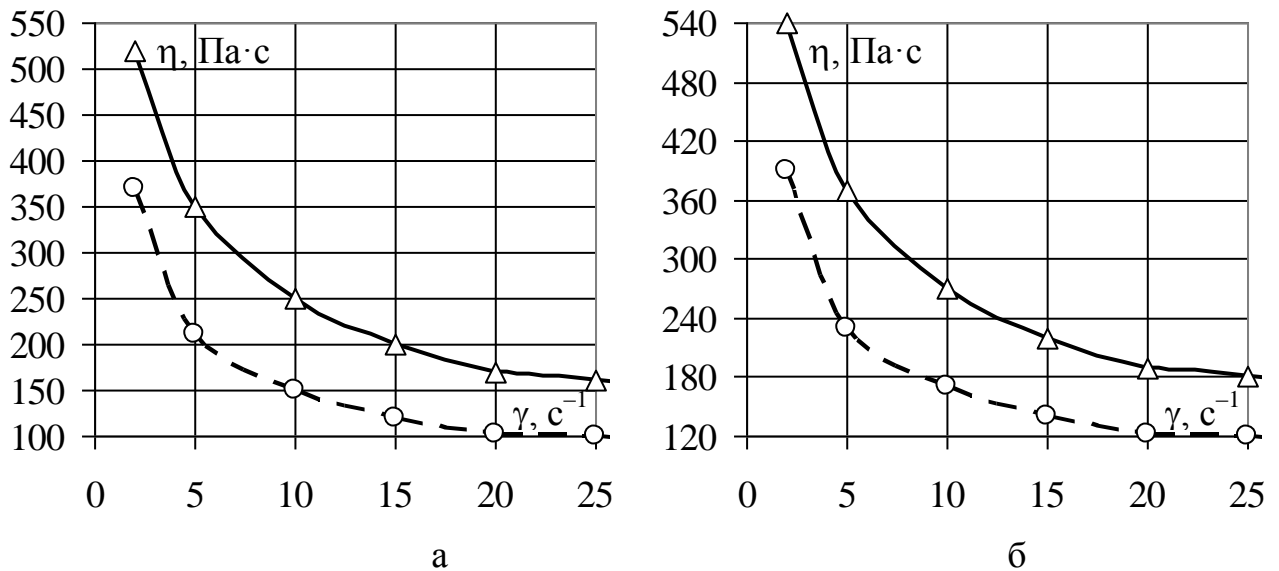


Рис. 5.42. Залежність ефективної в'язкості від швидкості зсуву дослідних зразків збивних мас: а – на агарі (—○— – зразок 1 - контроль, —△— – зразок 2 з 0,15% ХДМ); б – на пектині (—○— – зразок 3 - контроль, —△— – зразок 4 з 0,15% ХДМ)

Отже, дослідження структурно-механічних показників зефірних мас з різними структуроутворювачами підтверджують гіпотезу стабілізації їх структури НЧМ, що введення у рецептуру зефіру біло-рожевого ХДМ у вигляді водної суспензії на етапі «набрякання-розчинення» дозволяє скоротити його кількість: на (11 ± 1) % для агару і на (8 ± 1) % для пектину та сприяє підвищенню механічної міцності зефірних мас: на $(11,5 \dots 12,6)$ % для агару, і на $(8,2 \dots 9,1)$ % для пектину.

За результатами проведених досліджень визначено раціональні параметри технологічного процесу виготовлення зефіру біло-рожевого: *попереднє змішування* ВС ХДМ з пектином, яблучним пюре та цукром (кількість цукру дорівнює кількості пектину) ($n=2 \dots 2,2 \text{ c}^{-1}$, $\tau=(3 \dots 4) \times 60 \text{ c}$) з подальшим

набряканням пектиново-цукрово-магнетофудової суміші в яблучному пюре протягом $(70...90) \times 60$ с при температурі $(18...47)^\circ\text{C}$ і ретельному перемішуванні ($n=2...2,2\text{c}^{-1}$). *Набрякання* агару здійснюють у холодній воді при температурі $(18...20)^\circ\text{C}$ протягом $(50...80) \times 60$ с.

Потім *розчинення* драглеутворювача (зокрема, агару) при підігріві до температури $(95...100)^\circ\text{C}$ з додаванням ВС “Магнетофуд” та витримкою суміші протягом $(10...15) \times 60$ с при перемішуванні ($n=2...2,2\text{c}^{-1}$) або *протирання* пектиново-яблучно-магнетофудової суміш через сито (діаметр отворів $d=0,8 \cdot 10^{-3}$ м), *додавання* лактату натрію та *збивання* з підготовленим яєчним білком (швидкість збивання $n=3...3,3\text{c}^{-1}$) протягом $(4...6) \times 60$ с.

На підставі проведених досліджень складено рецептури і розроблено технологічні схеми зефіру біло-рожевого з використанням харчової добавки “Магнетофуд” під назвами: “Весна” (на агарі) та “Літо” (на пектині) [11, 26, 27, 36, 37], (Додаток А.29), (рис. 5.43, рис. 5.44).

Новим структурним елементом у розробленій технологічній системі є підсистема C_1 , яка передбачає введення ВС ХДМ на етапі “розчинення” агару при температурі $95...100^\circ\text{C}$ при перемішуванні $n=2...2,2\text{c}^{-1}$ на протязі $(10...15) \times 60$ с та на етапі “набрякання” пектину при температурі $(18...47)^\circ\text{C}$ при перемішуванні $n=2...2,2\text{c}^{-1}$ на протязі $(70...90) \times 60$ с. На етапі “набрякання пектину” відбувається його часткове структурування під дією НЧМ, що сприяє проникненню води у найбільш організовані ділянки ланцюга драглеутворювача. *Набрякання* пектиново-цукрово-магнетофудової суміші проводять в яблучному пюре (при попередньому змішуванні $n=2...2,2\text{c}^{-1}$ пектину, ВС ХДМ з цукром в кількості, що дорівнює кількості пектину) протягом $(70...90) \times 60$ с при температурі $(18...47)^\circ\text{C}$ і ретельному перемішуванні (швидкість перемішування $n=2...2,2\text{c}^{-1}$). На етапі “розчинення” агару НЧМ збільшують розчинність гелеутворювача, завдяки кластерофільності ХДМ і її взаємодії з полярними групами агару, що приводить до розгалуження головних

ланцюгів молекул гелеутворювача та їх розсуванню і кращого проникнення молекул води. Розчинення агару проводять при температурі $(95...100)^{\circ}\text{C}$ протягом $(10...15)\times 60\text{ с}$. Потім додають цукор і ретельно перемішують ($n=2...2,2\text{ с}^{-1}$) за температури $(95...98)^{\circ}\text{C}$ протягом $(20...30)\times 60\text{ с}$ та вмістом сухих речовин $\text{CP}=(84,5\pm 0,5)\%$. Одержують *агаро-цукровий сироп*. Яблучно-цукрово-пектиново-магнетофудову суміш *протирають* через сито з діаметром отворів $d=0,8\cdot 10^{-3}\text{ м}$ і направляють на *збивання* (куди залежно від кислотності використовуваного пюре вносять лактат натрію) з підготовленим яєчним білком. Тривалість *збивання* $(4...6)\times 60\text{ с}$ при швидкості $n=3...3,3\text{ с}^{-1}$. Одержують *білково-пектиново-яблучну суміш з ХДМ*. Приготування *агаро-цукрово-патокового сиропу з ХДМ*. В агаро-цукрово-магнетофудовий сироп додають підготовану патоку та перемішують ($n=2...2,2\text{ с}^{-1}$) при $(95...100)^{\circ}\text{C}$ протягом $(8...10)\times 60\text{ с}$. У випадку зефіру на пектині готують *цукрово-патоковий сироп* уварюванням цукру з патокою крохмальною при температурі $(105...110)^{\circ}\text{C}$ до вмісту сухих речовин $\text{CP}=(82,5\pm 2)\%$.

Технологічні схеми виробництва зефіру біло-рожевого “Весна” (на агарі) та “Літо” (на пектині) з використанням ХДМ наведені на рис. 5.44 і 5.45 відповідно та Додаток А. 29. На нові зефірні вироби розроблено нормативна та технологічна документація (Додатки Ж.13, Ж.14, Ж.15, Ж.16), отримані: патенти України (Додатки Б.14, Б.19, Б.24), акти випуску дослідних партій, виробничих відробок та упровадження в умовах ТОВ «Чарівна мозаїка» (Додатки Д.11, Д.12, П.2, П.3 та Р.5).

Вивчено мікробіологічні показники зефіру “Весна” (зразок 2) та “Літо” (зразок 4), знайдені відразу після виготовлення та після зберігання протягом 60 діб при відносній вологості повітря $\varphi=(75\pm 2)\%$ (Додаток А.25). Мікробіологічні показники зефіру відповідають нормативній документації, що свідчить про його високі санітарно-мікробіологічні характеристики [263, 529].

Аналіз сорбційних характеристик дослідних зразків зефіру 2,4 підтвердив оптимальні умови температурно-вологісного режиму під час зберігання зефіру біло-рожевого, знайдених з кінетичних кривих сорбції (Додаток А.24): вологість повітря $\varphi=(75\pm 2)\%$, температура $(18\pm 2)^{\circ}\text{C}$ [263, 529].

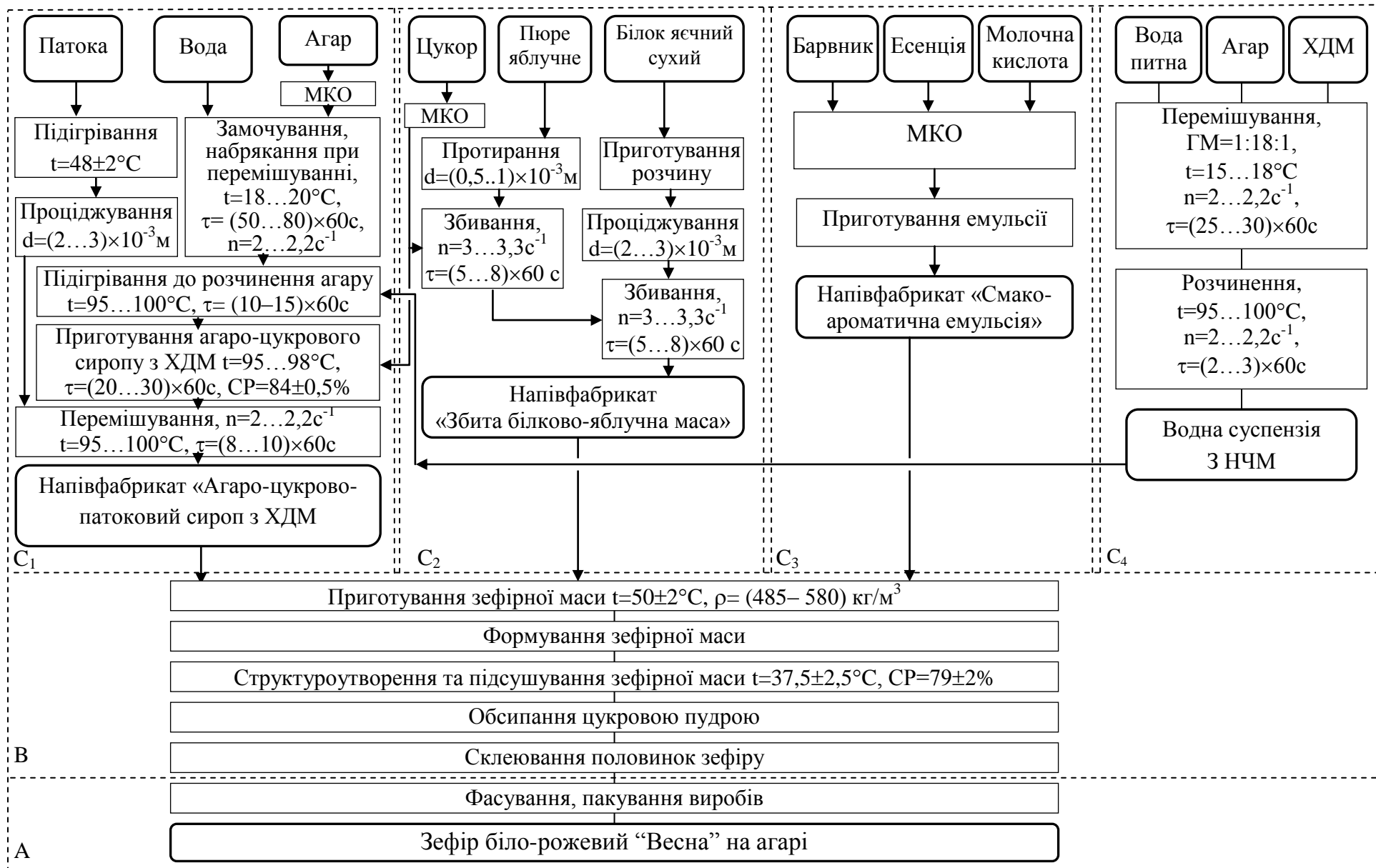


Рис. 5.43. Технологічна схема виробництва зефіру біло-рожевого "Весна" (на агарі): А – товарне оформлення і зберігання; В – виробництво зефіру; С₁, С₂, С₃, С₄ – підготовка матеріалів та сировини

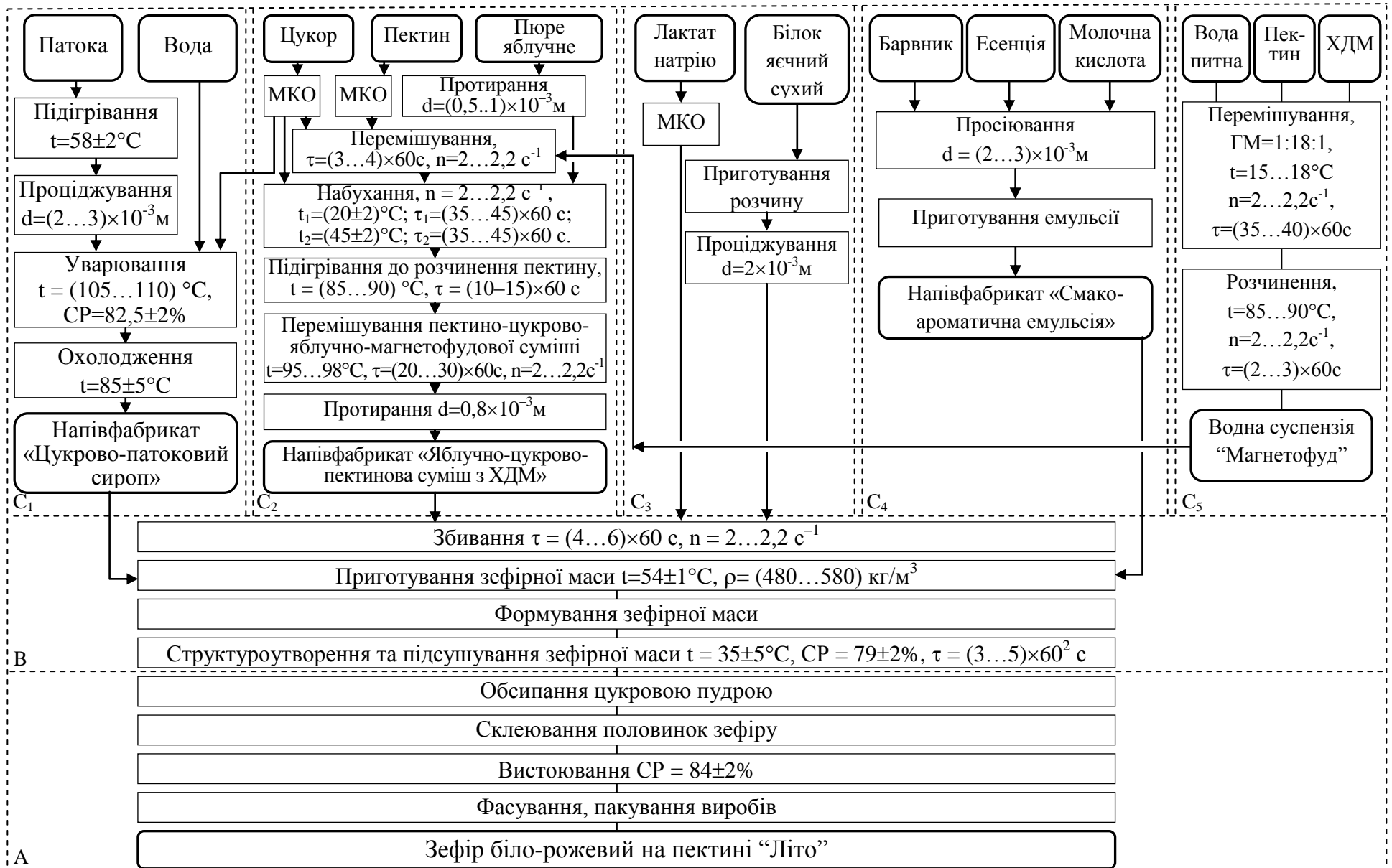


Рис. 5.44. Технологічна схема виробництва зефіру біло-рожевого "Літо" (на пектині): А – товарне оформлення і зберігання; В – виробництво зефіру; C₁, C₂, C₃, C₄, C₅ – підготовка матеріалів та сировини

Висновки за розділом 5

1. Встановлено, що раціональним способом введення ХДМ у харчову продукцію: борошняну (хліб, пряники, печиво), м'ясні посічені вироби (котлети, біфштекси з яловичини) та десерти з сиру кисломолочного – є жирова суспензія (ЖС). Визначено раціональні параметри отримання ЖС, до складу якої входить соняшникова олія та ХДМ у співвідношенні олія:ХДМ=50 мас.:%:50 мас.:%: ретельне перемішування суміші ($n=2,0\dots2,2 \text{ с}^{-1}$) за температури $t=45\dots50^\circ\text{C}$ протягом $\tau=(3\dots4)\times60 \text{ с}$. Відзначено, що використання ЖС у технології хлібобулочних, борошняних кондитерських, м'ясних посічених виробів та десертів із сиру кисломолочного приведе до скорочення технологічного циклу випікання хліба на $(20\dots25)\times60 \text{ с}$ та сприятиме стабілізації споживних властивостей готових виробів протягом зберігання. При цьому раціональна масова частка ХДМ дорівнює 0,15% від маси борошна для житньо-пшеничного хліба (або від маси рецептурної суміші для заварних пряників, вівсяного печива, сиркового десерту) та 0,10% від маси рецептурної суміші для м'ясних посічених виробів.

2. Доведено функціональність ХДМ в технології м'ясних посічених виробів: підвищується водозв'язувальна та водоутримувальна здатність в 1,28...1,32 раза, що приводить до формування соковитої та ніжної консистенції, відбувається зниження втрат під час теплової обробки на 5,0...6,0% і підвищення виходу готової продукції на 5,0...6,0%; підвищення жирозв'язувальної та жироутримувальної здатності в 1,26...1,29 раза, жироемульгувальної здатності в 1,24...1,26 раза та стійкості емульсій в 1,22...1,24 раза покращує в'язкопластичні властивості фаршів (зростає граничне напруження зсуву в 1,30...1,35 раза; збільшуються: пластична в'язкість в 1,36...1,40 раза, коефіцієнт консистенції в 1,12...1,15 раза, ефективна в'язкість в 1,6...1,7 раза, високоеластичний модуль в 1,15...1,17 раза, модуль мітцевої пружності в 1,18...1,22 раза), що обумовлює м'яку консистенцію та покращує формоутримувальну здатність фаршевих систем.

Визначено, що введення ХДМ функціонально впливає на структурно-механічні характеристики десерту із сиру кисломолочного: зі зростанням масової частки ХДМ збільшується максимальне напруження зсуву в 1,18...1,3 раза порівняно з контролем, зростає коефіцієнт тиксотропії в 1,26 раза. Встановлено, що такий характер впливу позитивно позначається на текстурі продукту.

3. Доведено, що для функціонування ХДМ у технологіях виробів пінної та гелеподібної структури, зокрема формового желейного мармеладу, зефіру біло-рожевого, збитих ягідно-плодових десертів (мусів, самбуків), ефективним технологічним способом є утворення водних суспензій (ВС) наночастинок ХДМ з відповідними структуроутворювачами, такими як желатин, агар, пектин. Визначено раціональні параметри утворення ВС: ГМ=1:18:1; $t_1=15...18^{\circ}\text{C}$; $n_1=2,0...2,2\text{ c}^{-1}$; $\tau_1=(30...40)\times 60\text{ c}$ для желатину, $\tau_1=(25...30)\times 60\text{ c}$ для агару, $\tau_1=(35...40)\times 60\text{ c}$ для пектину; $t_2=60...65^{\circ}\text{C}$ для желатину, $t_2=95...100^{\circ}\text{C}$ для агару, $t_2=85...90^{\circ}\text{C}$ для пектину; $n_2=2,0...2,2\text{ c}^{-1}$; $\tau_2=(2...3)\times 60\text{ c}$. Розроблено технології та вивчено органолептичні показники харчової продукції з використанням ХДМ: ягідно-плодових десертів – мусу «Малинка» і самбуку «Ягідка»; формового желейного мармеладу на агарі «Ранок» і на пектині «Веселка»; зефіру біло-рожевого на агарі «Весна» і на пектині «Літо». Визначено дисперсні характеристики пінних структур у десертах з сиру кисломолочного, з ягідно-плодової сировини (муси, самбуки) та в зефірних масах за умови введення ХДМ: функція розподілу повітряних пухирців за діаметром є вузькою та симетричною, діаметр $d=(45...50)\cdot 10^{-3}\text{ м}$ є панівним чинником, тобто наночасинки ХДМ забезпечують стабільність піни.

4. Доведено, що використання водних суспензій ХДМ (на етапі набрякання-розчинення гелеутворювача) у технологіях виробів гелеподібної структури (формового желейного мармеладу на агарі й пектині) функціонально впливає на структурно-механічні характеристики мармеладу:

збільшує в'язкість в 1,3...1,4 раза, швидкість структурування желейних мас в 1,3...1,4 раза; підвищує коефіцієнт тиксотропії в 1,4...1,5 раза; зміцнює просторовий каркас гелю в 1,3...1,5 раза, що позитивно позначається на текстурі продукту та подовженні терміну збереження його свіжості. Крім того, під час зберігання (75 діб) уповільнюється втрата вологи на 11...18% (порівняно з контролем) у таких умовах: відносна вологість повітря $\phi=(75\pm 2)\%$, температура $t=(18\pm 2)^\circ\text{C}$. Доведено, що в технології мармеладу желейного формового можна зменшити кількість агару на 9...11% і пектину на 7...9%.

5. Встановлено, що під час виробництва продукції пінної структури, зокрема зефіру біло-рожевого, наночастинки ХДМ, що містяться у ВС, виконують роль стабілізаторів піни та збільшують піноутворювальну здатність в 1,2...1,4 раза, забезпечують піностійкість на рівні $(99\pm 1)\%$. Доведено, що використання ХДМ у вигляді ВС приводить до утворення стійкої пінної структури ягідно-плодових десертів (збільшується піноутворювальна здатність мусів в 1,22...1,3 раза і самбуків в 1,23...1,38 раза; стійкість піни складає $(99\pm 1)\%$), відбувається і збільшення механічної міцності структури десертних пінних систем в 1,21...1,25 раза.

РОЗДІЛ 6

ДОКЛІНІЧНЕ ВИВЧЕННЯ ТОКСИКОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ХАРЧОВОЇ ДОБАВКИ «МАГНЕТОФУД»

У даному розділі узагальнено результати доклінічних випробувань деяких параметрів токсичності ХДМ в умовах *in vitro* та *in vivo* на лабораторних тваринах, а саме, параметрів гострої токсичності при внутрішньошлунковому введенні мишам (самці, самки), підгострої токсичності при внутрішньошлунковому введенні щурам обох статей, цитотоксичності та визначено фармакінетичні характеристики.

6.1 Дослідження гострої токсичності харчової добавки «Магнетофуд»

Одним з важливих етапів при створенні та впровадженні здорового, функціонального харчування є вивчення безпеки нових харчових добавок. Тому метою наступного етапу дослідження стало доклінічне вивчення деяких параметрів токсичності харчової добавки «Магнетофуд», а саме – параметрів гострої токсичності при внутрішньошлунковому введенні мишам (самці, самки), підгострої токсичності при внутрішньошлунковому введенні щурам обох статей та цитотоксичності.

Дослідження були проведені на білих безпородних мишах і щурах з дотриманням поведились згідно з правилами «Європейської конвенції по захисту хребетних тварин, яких використовують для експериментальних та наукових цілей» (Страсбург, 1986 р)

Результати дослідження оброблено за допомогою методів варіаційної статистики із розрахунком середніх значень (M) та їх стандартних помилок (m) або максимального (Max) та мінімального (Min) значень. Тип розподілу вибірок визначали у тесті Levene. У відповідності до характеру розподілу

оцінку міжгрупових відмінностей проводили з використанням параметричних методів (однофакторний дисперсійний аналіз ANOVA, критерій Ньюмена-Кейлса) або непараметричних методів аналізу (критерій Крускала-Уолліса, тест Манна-Уїтні). Прийнятий рівень значущості $p < 0,05$. Використано стандартний пакет програм STATISTICA 6 (методики доклінічних випробувань у Додатку М)

Дослідження гострої токсичності харчової добавки на основі подвійного оксиду заліза «Магнетофуд» (ХДМ) вивчали на 18 білих безпородних статевозрілих мишах самцях масою тіла 25,0-27,0 г при внутрішньошлунковому введенні. Дизайн дослідження наведений у таблиці 6.1.

Досліджуваний об'єкт вводили одноразово внутрішньошлунково вранці натще. Можливі прояви інтоксикації у вигляді порушень рухової активності, дихання, наявності та виразності судом, офтальмологічних, серцево-судинних симптомів, саливації, пілоерекції реєстрували одразу після введення досліджуваних засобів та надалі щоденно протягом 14 днів. До їжі тварин допускали через 2 години після введення харчової добавки, доступ до води був вільний.

Таблиця 6.1

**Дизайн дослідження гострої токсичності ХДМ на мишах
при внутрішньошлунковому введенні**

Експериментальні групи	Доза, мг/кг	Кількість тварин у групах	
		самці	самки
Інтактний контроль	–	6	6
ХДМ	5000	6	6

Загальний фізіологічний стан тварин оцінювали за динамікою маси тіла, яку реєстрували до початку експерименту (вихідні значення), на 3, 7 і 14 добу після введення досліджуваних засобів.

По закінченні терміну спостереження, тварин піддавали розтину і проводили макроскопічне обстеження – зовнішній огляд, огляд внутрішніх

органів грудної порожнини (серця, тимусу, легенів) і черевної порожнини (печінки, селезінки, сім'яників та нирок.

Внутрішні органи зважували і розраховували відносну масу (ВМ, %) за формулою (6.1):

$$\text{ВМ, \%} = \text{Маса органу (г)} / \text{Маса тварини (г)} \times 100\%, \quad (6.1)$$

где: ВМ – відносна маса органу

Відповідно до отриманих даних, при однократному внутрішньошлунковому введенні ХДМ у дозі 5000 мг/кг загибелі тварин не спостерігали (табл. 6.2).

Таблиця 6.2

Вживаність мишей при введенні ХДМ у дозі 5000 мг/кг

Експериментальні групи	Доза, мг/кг	Кількість тварин	
		що загинули	що вижили
Інтактний контроль	–	0	6
ХДМ	5000	0	6

Рефлекторна збудливість у всіх тварин була збережена. Спостереження за тваринами протягом 14 діб також не виявили токсичного впливу харчової добавки «Магнетофуд» на організм дослідних щурів. Фізіологічний стан та поведінка тварин не відрізнялися від щурів інтактного контролю.

Динаміка маси тіла тварин, яким однократно вводили харчової добавки «Магнетофуд» у дозі 5000 мг/кг наведена у таблиці 6.3. Відповідно до отриманих даних приріст маси тіла тварин статистично значуще не відрізнявся від приросту маси інтактних тварин, що свідчить про відсутність токсичного впливу ХДМ на загальнотрофічні процеси організму щурів (табл. 7.3).

Після закінчення терміну спостереження (через 14 діб) тварин знеживлювали і проводили розтин та макроскопічний огляд внутрішніх органів. Під час розтину і огляду внутрішніх органів тварин, при дослідженні шкірного покриву, слизових оболонок природних отворів, жодних ознак

інтоксикації та проявів патологічних процесів не виявлено. За розміром, кольором, консистенцією, а також розташуванням внутрішні органи тварин, яким вводили харчової добавки «Магнетофуд», не відрізнялися від органів інтактних тварин.

Таблиця 6.3

Динаміка зміни маси тіла (г) мишей при внутрішньошлунковому введенні ХДМ у дозі 5000 мг/кг – (M±m), n=6

Термін спостереження	Групи тварин					
	самці			самки		
	ANOVA	Інтактний контроль	ХДМ	ANOVA	Інтактний контроль	ХДМ
Початкова маса	p=0,4995	25,33±1,22	26,17±0,70	p=0,6697	26,83±0,88	26,16±1,58
3 день	p=0,3037	25,33±1,23	26,67±0,80	p=0,5993	27,16±0,80	26,33±1,65
7 день	p=0,3339	25,84±1,41	27,16±0,71	p=0,7128	27,58±0,87	26,92±1,91
14 день	p=0,3909	26,67±1,39	27,83±0,71	p=0,7510	27,66±0,85	27,08±1,96

В табл. 6.4–6.5 наведено відносна маса внутрішніх органів мишей при внутрішньошлунковому введенні ХДМ у дозі 5000 мг/кг, звідки слід, що введення ХДМ у дозі 5000 мг/кг не чинило токсичного впливу на внутрішні органи мишей обох статей, про що свідчить про відсутність статистично значущих відмінностей між відносною масою органів мишей, яким вводили досліджуваний засіб, та масою органів інтактних мишей.

Таблиця 6.4

Коефіцієнти мас внутрішніх органів (%) самців мишей при внутрішньошлунковому введенні ХДМ у дозі 5000 мг/кг, M (Min÷Max), n=6

Показники	Групи тварин		Kruskal-Wallis ANOVA by Ranks
	Інтактний контроль	ХДМ	
Печінка	4,41(3,44÷5,73)	4,24(4,11÷4,36)	p=0,6547
Нирки	1,20(0,90÷1,71)	1,22(1,03÷1,53)	p=0,4822
Серце	0,44(0,35÷0,62)	0,43(0,36÷0,52)	p=0,8480
Легені	0,74(0,65÷0,84)	0,71(0,56÷0,83)	p=0,5653
Селезінка	1,02(0,65÷2,30)	0,93(0,54÷1,82)	p=0,7484
Тимус	0,21(0,12÷0,41)	0,19(0,10÷0,32)	p=0,8480
Сім'яники	0,61(0,49÷0,75)	0,69(0,58÷0,81)	p=0,0639

Примітка. n – кількість тварин у кожній групі.

Коефіцієнти мас внутрішніх органів (%) самок мишей при внутрішньошлунковому введенні ХДМ у дозі 5000 мг/кг, М (Min÷Max), n=6

Показники	Групи тварин		Kruskal-Wallis ANOVA by Ranks
	Інтактний контроль	ХДМ	
1	2	3	4
Печінка	4,79(3,75÷6,75)	4,35(2,78÷5,52)	p=0,5653
Нирки	1,03(0,85÷1,24)	1,01(0,82÷1,24)	p=0,4062
Серце	0,46(0,40÷0,56)	0,40(0,30÷0,46)	p=0,0845
Легені	0,81(0,66÷0,91)	0,82(0,57÷1,17)	p=0,8480
Селезінка	0,72(0,42÷1,24)	0,77(0,51÷1,02)	p=0,6547
Тимус	0,17(0,09÷0,20)	0,17(0,12÷0,24)	p=0,5653

Примітка. n – кількість тварин у кожній групі.

З даних табл. 6.4–6.5 слід, що ХДМ за внутрішньошлункового введення мишам обох статей у дозі 5000 мг/кг не чинить токсичної дії та за класифікацією відноситься до IV класу токсичності.

Отже, встановлено максимально допустиму дозу ХДМ, яка не чинить шкідливого впливу на структуру тканин щурів у разі тривалого введення, 50 мг/кг та дозу, за умови введення якої починаються певні морфологічні зміни, 500 мг/кг. Визначено, що ХДМ належить до IV класу токсичності речовин – малотоксичні речовини ($LD_{50} > 5000$ мг/кг).

6.2 Вивчення підгострої токсичності, цитотоксичності та фармакокінетичних характеристик харчової добавки «Магнетофуд»

Підгостру токсичність вивчали на 36 білих статевозрілих щурах обох статей, масою 200–220 г. Оцінку токсичної дії ХДМ при повторних введеннях проводили на підставі змін показників, які характеризують стан периферичної крові, функціональний стан печінки, нирок, центральної нервової (ЦНС) та серцево-судинної систем (ССС). Стан загальнотрофічних процесів в організмі тварин оцінювали за динамікою маси тіла та відносної маси (ВМ) внутрішніх органів (методики досліджень у Додатку М).

Дизайн дослідження наведено у табл. 6.6.

**Дизайн дослідження підгострої токсичності ХДМ при
внутрішньошлунковому введенні щурам протягом 30 діб**

Експериментальні групи	Доза, мг/кг	Кількість тварин у групах	
		самці	самки
Інтактний контроль	-	6	6
ХДМ	500	6	6
ХДМ	2500	6	6

Протягом усього періоду експерименту проводили щоденні спостереження за поведінковими реакціями (активність, хода, темперамент), зовнішнім виглядом та загальним фізіологічним станом (споживання їжі та води, стан шерстного покриву, очей та зовнішніх статевих органів, вуха, кінцівок, зубів, наявності ран, пухлин, кровотечі, гіперемії мошонки та ін.). реєстрували виживання і можливі симптоми токсичного впливу досліджуваного засобу.

Масу тіла тварин визначали у динаміці: вихідні значення, на 3, 7, 15, 30 добу. Визначення впливу харчової добавки «Магнетофуд» на ЦНС щурів досліджували у загальноприйнятому в токсикології тесті «Відкрите поле». За зміною характеру поведінки щурів у даному тесті можна оцінити потенційні токсичні властивості досліджуваного засобу. Поведінку щурів обох статей досліджували на 30 добу введення харчової добавки «Магнетофуд». Оцінювали орієнтовно-рухову активність та емоційну реактивність щурів.

Вплив харчової добавки «Магнетофуд» на стан ССС вивчали за зміною параметрів електрокардіограми (ЕКГ).

Оцінку секреторної функції нирок проводили за допомогою навантажувального тесту водою. Кількість сечі, яка виділилася, розраховували в мл на 100 г маси тварин. Визначали рН сечі за допомогою діагностичної смужки, щільність сечі – ваговим методом. В сечі досліджували концентрацію сечовини уреазним методом, а креатиніну – за реакцією Яфе, Використовували набори фірми «Філісит-Діагностика» (Україна).

Забір крові у тварин здійснювали зранку натще після нічного голодування. В цільній крові визначали час згортання за методом Альтгаузена; концентрацію еритроцитів колориметричним методом (колориметр КФК-2МП); кількість лейкоцитів підраховували в камері Горяєва (мікроскоп «Granum L3000»); концентрацію гемоглобіну визначали гемоглобінціанідним методом (спектрофотометр СФ-46, набір фірми «Філісіт-Діагностика» (Україна). Досліджували лейкоцитарний склад крові (у мазках крові підраховували відсоток паличкоядерних та сегментоядерних нейтрофілів, еозинофілів, моноцитів, лейкоцитів).

В плазмі крові досліджували вміст фібриногену – повітряно-ваговим методом та протромбіновий час з тромбін-кальцієвою сумішшю (виробник «НПО РЕНАМ», Росія) за допомогою коагулометричного аналізатора RT-2204С.

Оцінку впливу досліджуваних об'єктів на функціональний стан печінки і різні метаболічні процеси проводили за низкою біохімічних показників у сироватці крові в кінці терміну спостереження.

Макроскопічне дослідження дослідних тварин включало: зовнішній огляд, огляд внутрішніх органів грудної (серце, легені, тимус) та черевної і тазової порожнин (печінка, селезінка, нирки, наднирники, сім'яники/яєчники). Внутрішні органи зважували на електронних вагах (AD300) та розраховували відносну масу (ВМ) за формулою (6.1).

Досліджено гістоструктуру серцевого м'язу, нирок, печінки, легень, підшлункової залози, тимусу, селезінки, наднирників, статевих органів, фрагментів слизової стравоходу, шлунка, порожньої та прямої кишки білих щурів обох статей після внутрішньошлункового введення харчової добавки «Магнетофуд» протягом 30 днів у дозах 500 мг/кг та 2500 мг/кг. Для контролю використовували аналогічні органи інтактних тварин. Зразки органів фіксували у 10% розчині формаліну, зневоднювали у спиртах зростаючої міцності, заливали у парафін. Блоки зі зразками органів різали на санному мікротомі, зрізи фарбували гематоксиліном і еозином. Перегляд

мікропрепаратів проводили під світловим мікроскопом Granum, мікрофотографування мікроскопічних зображень здійснювали цифровою відеокамерою Granum ДСМ 310. Фотознімки обробляли на комп'ютері Pentium 2,4GHz за допомогою програми Tour View.

Таблиця 6.7

Динаміка зміни маси тіла (г) щурів при внутрішньошлунковому введенні ХДМ в дозах 500 і 2500 мг/кг протягом 30 днів, ($M \pm m$), $n=6$

Термін дослідження	Групи тварин		
	Інтактний контроль	ХДМ, 500 мг/кг	ХДМ, 2500 мг/кг
самці			
Вихідні дані	243±7	247±8	242±5
1 тиждень	268±3*	263±10	257±6
2 тиждень	296±4*	299±9*	292±8*
3 тиждень	310±4*	312±12*	315±11*
4 тиждень	328±5*	336±13*	332±16*
самки			
Вихідні дані	179±8	183±4	177±2
1 тиждень	188±5	197±5	193±4*
2 тиждень	193±4	198±5	196±4*
3 тиждень	200±5	204±5	203±5*
4 тиждень	206±8*	204±11	206±3*

Примітки:

1. для статистичного аналізу даних використані дисперсійний аналіз *ANOVA RM* і критерій Ньюмена-Кейлса;
2. * – рівень статистичної значущості при порівнянні з вихідними даними (критерій Ньюмена-Кейлса), $p < 0,05$;
3. n – кількість тварин у кожній групі.

Як показало проведене дослідження (табл. 6.7) за внутрішньошлункового введення харчової добавки «Магнетофуд» у дозах 500 мг/кг і 2500 мг/кг протягом 30 діб, випадків летальності, агресивної поведінки та ознак інтоксикації у щурів не спостерігали.

Аналіз динаміки приросту маси тіла показав, що маса щурів з групи ІК та щурів, які отримували харчову добавку «Магнетофуд» в дозах 500 і 2500 мг/кг відповідно протягом 30 днів, помірно зростала протягом експерименту

(табл. 6.7), що є фізіологічно обумовленим процесом за відсутності впливу несприятливих факторів та свідчить про відсутність негативного впливу ХДМ на організм тварин за тривалого застосування; випадків летальності, агресивної поведінки та ознак інтоксикації у щурів не спостерігали.

В табл. 6.8 та 6.9 наведені показники функціонального стану ЦНС та гематологічні показники щурів при внутрішньошлунковому введенні ХДМ відповідно.

Таблиця 6.8

Показники функціонального стану ЦНС у щурів при внутрішньо-шлунковому введенні ХДМ (М (Min÷Max), n =6

Показники	Групи тварин		
	Інтактний контроль	ХДМ, 500 мг/кг	ХДМ, 2500 мг/кг
1	2	3	4
Самці			
Кількість перетинань	12,50 (1÷34)	23,50 (4÷55)	14,50 (4÷47)
Кількість вертикальних стійок	1,33 (0÷5)	3,83 (0÷8)	2,83 (0÷11)
Кількість зазирань у нірки	0,67 (0÷1)	1,33 (0÷3)	0,67 (0÷2)
Кількість дефекацій	0,83 (0÷3)	1,50 (0÷6)	1,17 (0÷4)
Кількість уринацій	1,00 (0÷5)	0,67 (0÷2)	0,67 (0÷2)
Кількість умивань	0,00 (0÷0)	0,83 (0÷4)	0,00 (0÷0)
Емоційний стан	1,83 (0÷6)	3,00 (0÷7)	1,83 (0÷6)
Сума активностей	16,33 (1÷41)	31,67 (11÷69)	19,83 (6÷61)
Самки			
Кількість перетинань	14,50 (9÷27)	15,50 (4÷32)	21,17 (3÷42)
К-ть вертикальних стійок	3,17 (0÷8)	2,50 (0÷7)	2,33 (1÷6)
К-ть зазирань у нірки	0,67 (0÷2)	0,33 (0÷1)	0,83 (0÷2)
Кількість дефекацій	1,00 (0÷3)	0,33 (0÷2)	0,17 (0÷1)
Кількість уринацій	0,50 (0÷2)	0,17 (0÷1)	0,83 (0÷3)
Кількість умивань	0,00 (0÷0)	1,00 (0÷3)	1,33 (0÷3) *
Емоційний стан	1,50 (0÷3)	1,50 (0÷3)	2,33 (1÷4)
Сума активностей	19,83 (5÷34)	19,83 (5÷41)	26,67 (8÷52)

Примітки:

1. для статистичного аналізу даних використано критерій Манна-Уїтні;
2. n – кількість тварин у кожній групі.

Як видно з табл. 6.8, досліджуваний засіб не впливає на рухову, дослідницьку активність та емоційну реактивність щурів. Отже, ХДМ не чинить негативного впливу на стан ЦНС та не виявляє нейротоксичної дії.

Результати вивчення можливого токсичного впливу харчової добавки «Магнетофуд» на периферичну кров наведено в таблиці 6.9.

Таблиця 6.9

**Гематологічні показники щурів при внутрішньошлунковому введенні
ХДМ (М (Min÷Max), n =6**

Показники	Групи тварин		
	Інтактний контроль	ХДМ, 500 мг/кг	ХДМ, 2500 мг/кг
Самці			
Еритроцити, 10^9 /л	7,12±0,27	7,13±0,06	7,29±0,12
Гемоглобін, г/л	130,1±3,82	133,1±4,21	131,4±3,71
Лейкоцити, 10^{12} /л	10,52±1,11	11,36±0,49	8,42±0,62
Самки			
Еритроцити, 10^9 /л	5,00±0,08	4,98±0,28	4,95±0,16
Гемоглобін, г/л	123,24±4,04	117,16±2,99	118,17±1,74
Лейкоцити, 10^{12} /л	9,34±0,51	7,53±0,86	8,2±0,97

Примітки:

1. для статистичного аналізу даних використано критерій Манна-Уїтні;
2. n – кількість тварин у кожній групі.

З табл. 6.9 випливає, що за застосування ХДМ всі гематологічні показники самців та самок щурів знаходяться в межах фізіологічних коливань, що свідчить про відсутність шкідливого впливу ХДМ на систему еритро- та лейкопоезу.

Склад лейкоцитарної формули у піддослідних щурів не відрізнявся від значень групи ІК. Патологічних зсувів лейкоцитарної формули не відмічено. Оцінку гемостазу тварин проводили за показниками – час згортання крові, вміст фібриногену і протромбіновий час (табл. 6.10), звідки видно, що ХДМ не чинить суттєвого впливу на гемостаз дослідних тварин. Коливання всіх досліджуваних показників, окрім протромбінового часу у самців, у тварин

обох статей відбувалося в межах значень показників групи ІК, що вказує на відсутність гемотоксичної дії досліджуваних об'єктів.

Таблиця 6.10

Показники гемостазу крові щурів при внутрішньо шлунковому введенні ХДМ $M \pm m$, $n=6$

Показники	Групи тварин		
	Інтактний контроль	ХДМ, 500 мг/кг	ХДМ, 2500 мг/кг
Самці			
Час згортання, с	147,80±10,04	162,30±11,42	143,7±11,58
Фібриноген, г/л	2,48±0,09	2,22±0,38	2,11±0,14
Протромбіновий час, с	17,37±0,35	16,12±0,48	15,25±0,46*
Самки			
Час згортання, с	185,80±9,98	182,00±19,51	189,6±6,4
Фібриноген, г/л	2,11±0,18	1,52±0,15	1,55±0,19
Протромбіновий час, с	13,63±0,53	13,43±0,41	14,27±0,18

Примітки:

1. для статистичного аналізу даних використані дисперсійний аналіз *ANOVA RM*, критерій Ньюмена-Кейлса;
2. n – кількість тварин у кожній групі.

У самців, яким вводили ХДМ у дозі 2500 мг/кг спостерігали статистично значуще зниження протромбінового часу, але на загальний показник, «час згортання крові», це не вплинуло, що дає можливість констатувати відсутність порушень загортальної ланки гемостазу за тривалого введення ХДМ. Крім того, відсутність статистично значущих змін концентрації фібриногену між дослідними та інтактною групою також підтверджує відсутність суттєвих патологічних змін загортальної ланки гемостазу на тлі ХДМ.

Вивчення цитотоксичної дії харчової добавки «Магнетофуд». Було проведено на базі проблемної лабораторії морфофункціональних досліджень, зав. лабораторією, проф. Малоштан Л.М. на культурі клітин червоного

кісткового мозку щурів. Досліджувану ХДМ за допомогою дозатора вносили у лунки планшету для імунологічних реакцій, після чого в кожну лунку додавали рівний об'єм клітинної суспензії кісткового мозку.

Досліджували наступні концентрації діючої речовини: 20 мг/мл, 10 мг/мл, 5 мг/мл, 2 мг/мл, 0,02 мг/мл, 0,00002 мг/мл. В якості контролю використовували фізіологічний розчин.

Оцінку цитотоксичного ефекту субстанції проводили через 15, 30, 60, 90 хвилин інкубації. Для визначення життєздатності клітин використовували метод забарвлення 0,1% розчином трипанового синього.

Результати дослідження цитотоксичності харчової добавки «Магнетофуд» в тесті з використанням трипанового синього на культурі клітин червоного кісткового мозку представлені на рис. 6.1, а та рис. М. 3.1.

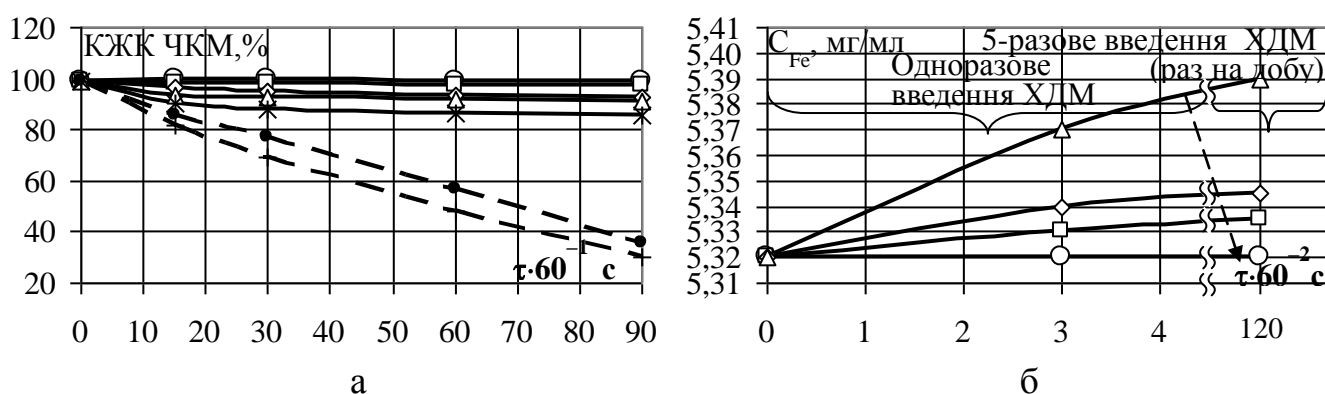


Рис. 6.1 Цитотоксичні властивості (а) та фармакокінетичні характеристики (б) ХДМ під час інкубації у різних концентраціях: (а – $C_{\text{ХДМ}}$ в мг/мл): \circ – інтактний контроль; \square – 0,002; \diamond – 0,02; \triangle – 2,5; \ast – 5,0; \bullet – 10,0; $\text{---}+$ – 20,0; (б – $C_{\text{ХДМ}}$ в мг/кг): \circ – інтактний контроль; \square – 10,0; \diamond – 50,0; \triangle – 500,0

Звідки випливає, що зі збільшенням концентрації ХДМ підвищуються її цитотоксичні властивості. У концентраціях 0,00002 мг/мл, 0,02 мг/мл і 2,5 мг/мл ХДМ не викликала зниження кількості життєздатних клітин кісткового мозку протягом усього періоду спостереження, що вказує на відсутність цитотоксичного ефекту досліджуваного продукту в цих концентраціях. Крім

того, при експозиції 90 хв ХДМ в концентрації 0,00002 мг/мл з клітинами кісткового мозку спостерігали статистично значуще збільшення кількості живих клітин в порівнянні з контролем ($p=0,0222$). Отримані дані дозволяють припустити наявність захисної дії у ХДМ при тривалій інкубації з клітинами кісткового мозку щурів в концентрації 0,00002 мг/мл.

Таким чином, на підставі отриманих даних можна зробити висновки, що цитотоксичність ХДМ залежить від дози і часу контакту з культурою клітин червоного кісткового мозку. Встановлено найбільш безпечні концентрації (2,5 мг/мл, 0,02 мг/мл, 0,00002 мг/мл), в яких харчова добавка не проявляє цитотоксичної дії. Крім того, в концентрації 0,00002 мг/мл при тривалій експозиції з клітинами кісткового мозку щурів ХДМ чинить захисну дію, яка пояснюється її антиоксидантними властивостями.

Визначення концентрації катіонів Fe^{3+} у сироватці крові щурів та фармакокінетичних характеристик харчової добавки «Магнетофуд». Проводили методом атомно-абсорбційної спектроскопії (спектрофотометр «Сатурн») (Додаток М.). Для дослідження брали зразки сироватки крові та тканини внутрішніх органів (печінки, легень, нирок серця та кишечника) щурів, яким вводили ХДМ у дозах 500 мг/кг, 50 мг/кг і 10 мг/кг, масою 200 мг. В муфельній печі проводили попереднє озоління зразків тканини при 800°C протягом 2 годин. Потім до озолоного залишку додавали 1 мл конц. HNO_3 і 4 мл H_2O . Для аналізу брали 5 мл сироватки і 5 мл азотнокислого розчину озолоної тканини. Концентрацію атомів Fe^{3+} у дослідних зразках сироватці крові щурів визначали за методом градувального графіка (рис. М.2.1).

Відповідно до отриманих даних (рис. 6.1, б та табл. М.2.1), за одноразового введення та введення протягом 5 діб у сироватці крові щурів спостерігали однакову концентрацію атомів Fe^{3+} , яка статистично значуще не відрізняється від концентрації у сироватці крові інтактних щурів. Отже, на підставі отриманих даних можна зробити висновок, що як одноразове, так і

введення протягом 5 діб ХДМ не викликає накопичення заліза у сироватці крові щурів.

З огляду на те, що при дослідженні хронічної токсичності ХДМ було встановлено, що при застосуванні харчової добавки «Магнетофуд» у дозах 500 мг/кг та 2500 мг/кг спостерігається накопичення залишків заліза у цих органах у вигляді гемаседерину, представляло інтерес дослідити концентрацію атомів Fe^{3+} у органах щурів на тлі критичної дози – 500 мг/кг, за застосування якої починаються виявлені ознаки. Харчову добавку «Магнетофуд» вводили щурам протягом 10 діб. Результати визначення концентрації Fe^{3+} у дослідних зразках сироватці крові та тканих органів щурів наведені на рис. 6.1, б та у таблиці М. 2.3. Звідки випливає, що результати визначення концентрації Fe^{3+} у дослідних зразках сироватці крові та тканих органів щурів співвідносяться з результатами гістологічного дослідження. Харчова добавка «Магнетофуд» при 10-денному введенні у дозі 500 мг/кг виявляє властивості до накопичення у печінці, легенях та серці, про що свідчить статистично значуще більша концентрація Fe^{3+} у цих органах у порівнянні з інтактним контролем.

Таким чином, встановлено, що зі збільшенням концентрації ХДМ у фізіологічному розчині (у тесті *in vitro* з використанням трипанового синього) до 5,0 мг/мл кількість життєздатних клітин червоно кісткового мозку (КЖК ЧКМ) стала, що вказує на відсутність цитотоксичного ефекту цієї добавки (рис. 6.1, а). У концентраціях ХДМ до 20 мг/мл кількість життєздатних клітин за час інкубації зменшується в 2,5 рази. Дослідженнями фармакокінетичних характеристик за умов перорального введення харчової добавки «Магнетофуд» в дозах 10, 50, 500 мг/кг (рис. 6.1, б) визначено, що у внутрішніх органах щурів концентрація атомів феруму через 5 діб майже не відрізняється від концентрації в сироватці крові.

У табл. 6.11–6.12 наведено показники вуглеводного та ліпідного обмінів та функціональний стан печінки за умов тривалого застосування ХДМ.

Таблиця 6.11

Динаміка біохімічних показників сироватки крові щурів самців, яким вводили ХДМ, $M \pm m$, $n=6$

Показники	Групи тварин		
	Інтактний контроль	ХДМ, 500 мг/кг	ХДМ, 2500 мг/кг
1	2	3	4
Загальний білок, г/л	65,83±1,47	63,19±1,13	63,06±1,15
АлАТ, мккат/л	0,61±0,02	0,67±0,03	0,67±0,08
АсАТ, мккат/л	0,80±0,06	0,81±0,06	0,68±0,05
Сечовина, ммоль/л	5,85±0,40	5,63±0,35	5,75±0,50
Креатинін, ммоль/л	0,111±0,003	0,108±0,008	0,117±0,005
Холестерин, ммоль/л	2,01±0,05	1,41±0,26	2,17±0,19
Глюкоза, ммоль/л [#]	5,96±0,24	5,71±0,28	5,24±0,31

Примітки:

1. для статистичного аналізу даних використані дисперсійний аналіз *ANOVA RM*, критерій Ньюмена-Кейлса і Манна-Уїтні;
2. n – кількість тварин у кожній групі.

Як видно з табл. 6.11–6.12, за повторних введеннь ХДМ вміст глюкози і загального холестерину в сироватці крові у тварин обох статей, окрім групи самок, які отримували досліджуваний засіб у дозі 2500 мг/кг, статистично значуще не відрізняється від показників інтактних тварин, що свідчить про відсутність токсичного впливу ХДМ на вуглеводний та ліпідний обміни.

Таблиця 6.12

Динаміка біохімічних показників сироватки крові щурів самок, яким вводили ХДМ, $M \pm m$, $n=6$

Показники	Групи тварин		
	Інтактний контроль	ХДМ, 500 мг/кг	ХДМ, 2500 мг/кг
Загальний білок, г/л	67,85±3,00	70,63±1,51	69,31±1,70
АлАТ, мккат/л	0,44±0,03	0,48±0,04	0,36 ±0,01
АсАТ, мккат/л	0,72±0,04	0,70±0,04	0,69±0,02
Сечовина, ммоль/л	5,35±0,50	5,46±0,43	5,96±0,58
Креатинін, ммоль/л	0,109±0,003	0,105±0,005	0,114±0,005
Холестерин, ммоль/л	2,68±0,07	2,29±0,15	2,05±0,11*
Глюкоза, ммоль/л	5,87±0,12	6,43±0,19	6,53±0,26

Примітки:

1. для статистичного аналізу даних використані дисперсійний аналіз *ANOVA RM*, критерій Ньюмена-Кейлса і Манна-Уїтні;
2. n – кількість тварин у кожній групі.

У групі самок, які отримували досліджуваний засіб у дозі 2500 мг/кг, рівень холестерину статистично значуще знижувався. Оскільки коливання цього показника не виходило за межі фізіологічних норм, данні відмінності можна вважати не суттєвими. Активність цитолітичних ферментів АлАТ і АсАТ була на рівні значень інтактного контролю, що вказує на нормальний функціональний стан печінки тварин. Фізіологічні рівні вмісту сечовини та креатиніну у сироватці крові вказують на збереженість детоксикаційної функції печінки (табл. 6.11–6.12). Отже отримані дані свідчать про відсутність гепатотоксичних властивостей у ХДМ.

Результати визначення біохімічних показників у сечі (табл. 6.13–6.14), які характеризують функціональний стан нирок на тлі застосування ХДМ у дозах 500 мг/кг та 2500 мг/кг показали, що як у самців, так і у самок щурів, яким вводили харчову добавку, об'єм діурезу, густина та рН сечі залишалися у межах фізіологічних коливань. Вміст сечовини та креатиніну у сечі також був на рівні значень інтактного контролю. Статистичний аналіз отриманих даних не виявив статистично значущих відмінностей між дослідними групами та інтактним контролем

Таблиця 6.13

**Динаміка біохімічних показників сечі щурів самців,
яким вводили ХДМ, $M \pm m$, $n=6$**

Показники	Групи тварин		
	Інтактний контроль	ХДМ, 500 мг/кг	ХДМ, 2500 мг/кг
Діурез, мл/100г маси	2,04±0,22	1,83 ±0,14	1,67±0,23
рН сечі, од. рН	6,67±0,33	7,17±0,17	7,50±0,22
Густина сечі, г/мл	1,008±0,001	1,008±0,001	1,007±0,001
Сечовина в сечі, ммоль/(л*3год)	125,98±21,12	118,18±13,13	105,39±17,60
Креатинін в сечі, ммоль/(л*3год)	2,79±0,26	3,12 ±0,55	2,94±0,40

Примітки:

1. для статистичного аналізу даних використані дисперсійний аналіз *ANOVA RM*, критерій Ньюмена-Кейлса і Манна-Уїтні;
2. *n* – кількість тварин у кожній групі.

Статистичний аналіз отриманих даних не виявив статистично значущих відмінностей між дослідними групами та інтактним контролем (табл. 6.13–6.14).

Таблиця 6.14

**Динаміка біохімічних показників сечі щурів самок,
яким вводили ХДМ, $M \pm m$, $n=6$**

Показники	Групи тварин		
	Інтактний контроль	ХДМ, 500 мг/кг	ХДМ, 2500 мг/кг
Діурез, мл/100г маси	2,94±0,19	1,46±0,48*	1,16±0,24*
pH сечі, од. pH	6,50±0,22	7,17±0,40	6,83±0,17
Густина сечі, г/мл	1,012±0,001	1,011±0,001	1,010±0,002
Сечовина в сечі, ммоль/(л*3год)	124,34±17,10	98,75±35,70	103,05±34,30
Креатинін в сечі, ммоль/(л*3год)	2,04±0,23	1,97 ±0,64	1,87±0,40

Примітки:

1. для статистичного аналізу даних використані дисперсійний аналіз *ANOVA RM*, критерій Ньюмена-Кейлса і Манна-Уїтні;
2. *n* – кількість тварин у кожній групі.

Отже, на підставі отриманих даних можна констатувати, що введення ХДМ протягом одного місяця не впливає на функціональний стан нирок самців та самок щурів та не чинить нефротоксичної дії.

В табл. 6.15 наведено функціональний стан ССС білих щурів на тлі внутрішньошлункового застосування харчової добавки «Магнетофуд». Звідки видно, що харчова добавка «Магнетофуд» суттєво не впливає на функціональний стан серця. Параметри ЕКГ, щурів, яким вводили харчову добавку протягом 30 діб, знаходилися у межах фізіологічної норми для даного виду тварин.

**Динаміка показників ЕКГ щурів самців та самок щурів,
яким вводили ХДМ, $M \pm m$, $n=6$**

Показники	Групи тварин		
	Інтактний контроль	ХДМ, 500 мг/кг	ХДМ, 2500 мг/кг
1	2	3	4
Самці			
ЧСС, уд/хв	470,00±14,29	465,17±17,52	442,00±14,44
СП,%	48,33±1,80	46,50±1,75	49,00±1,77
PQ, с	0,049±0,003	0,053±0,003	0,049±0,002
QRS, с	0,014±0,001	0,015±0,001	0,015±0,001
QT, с	0,062±0,002	0,060±0,000	0,067±0,002
R, мВ	0,58±0,08	0,68 ±0,10	0,74±0,04
P, мВ	0,13±0,02	0,11±0,01	0,14±0,02
T, мВ	0,14±0,01	0,16±0,01	0,19±0,01*
Самки			
ЧСС, уд/хв	451,83±11,68	486,50±42,49	462,83 ±9,18
СП,%	45,17±1,14	50,00±1,90	50,00±1,46
PQ, с	0,051±0,002	0,042±0,002*	0,047±0,002
QRS, с	0,014±0,001	0,013±0,001	0,012±0,001
QT, с	0,060±0,000	0,062±0,002	0,065±0,002
R, мВ	0,71±0,08	0,53±0,09	0,63±0,13
P, мВ	0,12±0,02	0,11±0,00	0,11±0,01
T, мВ	0,20±0,01	0,11±0,01*	0,15±0,02*

Примітки:

1. для статистичного аналізу даних використані дисперсійний аналіз *ANOVA RM*, критерій Ньюмена-Кейлса і Манна-Уїтні;
2. n – кількість тварин у кожній групі.

У всіх тварин реєстрували правильний синусовий ритм, про що свідчила наявність зубця Р. Електрична систола (тривалість інтервалу QT) у щурів обох статей була у межах фізіологічної норми.

Крім того, у щурів, яким вводили харчову добавку, частота серцевих скорочень та систолічний показник статистично значуще не відрізнялися від

аналогічних показників інтактних тварин, що свідчить про нормальну електропровідність серця. Отже, тривале введення ХДМ у дозах 500 і 2500 мг/кг не чинить токсичної дії на функціональний стан серця.

Визначення відносної маси внутрішніх органів показало відсутність статистично значущих відмінностей показників самців та самок, що отримували ХДМ протягом 30 діб, від аналогічних показників щурів обох статей з групи ІК (табл. 6.16).

Таблиця 6.16

**Коефіцієнти мас внутрішніх органів (%) самців та самок щурів,
яким вводили ХДМ, М (Min÷Max), n=6**

Показники	Групи тварин		
	Інтактний контроль	ХДМ, 500 мг/кг	ХДМ, 2500 мг/кг
Самці			
Печінка	3,81 (3,58÷4,07)	3,60 (3,35÷3,85)	3,68 (3,49÷3,90)
Нирки	0,60 (0,57 ÷0,64)	0,61 (0,58÷0,68)	0,67 (0,60÷0,95)
Серце	0,31 (0,29÷0,33)	0,33 (0,28÷0,39)	0,31 (0,29÷0,34)
Легені	0,65 (0,56÷0,74)	0,68 (0,49÷0,83)	0,58 (0,47÷0,83)
Селезінка	0,35 (0,32÷0,38)	0,33 (0,23÷0,45)	0,33 (0,23÷0,46)
Наднирники	0,021(0,018÷0,022)	0,024 (0,020÷0,029)	0,024 (0,011÷0,050)
Тимус	0,099 (0,065÷0,138)	0,080 (0,065÷0,096)	0,071 (0,059÷0,088)
Сім'яники	1,04 (0,88÷1,20)	1,02 (0,96÷1,14)	0,99 (0,93÷1,15)
Самки			
Печінка	3,31 (2,67÷4,00)	3,49 (3,31÷3,60)	3,37 (3,09÷3,95)
Нирки	0,61 (0,54÷0,66)	0,62 (0,58÷0,68)	0,61 (0,56÷0,66)
Серце	0,34 (0,32÷0,37)	0,34 (0,31÷0,40)	0,35 (0,32÷0,40)
Легені	0,64 (0,52÷0,72)	0,85 (0,64÷1,04)*	0,73 (0,61÷0,88)
Селезінка	0,39 (0,36 ÷0,46)	0,43 (0,37÷0,58)	0,42 (0,30÷0,52)
Наднирники	0,033 0,028÷0,039)	0,032 (0,023÷0,039)	0,038 (0,031÷0,046)
Тимус	0,152 0,119÷0,205)	0,140 (0,077÷0,199)	0,182 (0,100÷0,244)

Примітки:

1. для статистичного аналізу даних використані дисперсійний аналіз *ANOVA RM*, критерій Ньюмена-Кейлса і Манна-Уїтні;
2. n – кількість тварин у кожній групі.

Узагальнюючи одержані результати можна зробити висновок, що за тривалого введення у дозах 500 і 2500 мг/кг протягом 30 діб, ХДМ не чинить

токсичного впливу на гемостаз та функціональний стан печінки, нирок, серця і ЦНС білих щурів обох статей.

6.3. Дослідження впливу харчової добавки «Магнетофуд» на гістоструктуру внутрішніх органів білих щурів за повторних введень

Детальний опис гістологічного дослідження див. у Додатку М.

Печінка. Структурна організація печінкової паренхіми у інтактних щурів обох статей була типовою для цього виду тварин. Часточковий малюнок тканини не чіткий. Межі часточок знаходили по тріадам (зони портальних трактів). Самі зони вузькі. Кількість стромальної сполучної тканини у зонах тріад у межах норми. Клітинної інфільтрації у портальних трактах і у паренхімі органу не відмічено. Стан ендотелію вени та артерії, епітелію жовчного протока, що входили до складу триад, ендотелію інших кровоносних судин відповідав нормі. Радіальна спрямованість печінкових пластинок не порушена. Гепатоцити мали характерну форму та розмір, чіткі клітинні межі. Ядра клітин овальні, розташовані центрально, помірно варіювали за розміром, містили переважно одно, рідше 2 ядерця. Цитоплазма багата на глікоген, який в процесі підготовчого технологічного процесу часто розчинявся, особливо у гепатоцитах перипортальних зон, що на рисунках мікропрепаратів відображається пустотами. Наявність двоядерних клітин нормальна. Клітин, що знаходилися у різних фазах поділу, у межах мікропрепарату не знайдено. Синусоїдальні гемокапіляри, судини портальних трактів і центральні вени звичайного кровонаповнення. Стан зоряних ретикулоендотеліоцитів відповідав звичайному (рис. М. 1.1 – балкова структура збережена, у цитоплазмі гепатоцитів видні пустоти, що утворилися внаслідок розчинення глікогену. Вміст лейкоцитів у гемокапілярах незначний, клітини Купфера не активовані. Гематоксилін-еозин x250).

Після 30 денного введення ХД на основі подвійного оксиду заліза «Магнетофуд» у дозі 500 мг/кг радіальна спрямованість гепатоцитів в основному збережена. Відмічено активацію клітин Купфера, нерівномірне помітне збільшення повнокровності гемокапілярів, насиченості їх круглоядерними лейкоцитами – лімфоцитами і макрофагами. У розширених синусоїдах та цитоплазмі гепатоцитів місцями видно дрібні накопичення бурого пігменту, ймовірно гемосидерін (рис. М.1.2 – харчова добавка «Магнетофуд» у дозі 500 мг/кг: повнокровність гемокапілярів; збільшення насиченості гемокапілярів круглоядерними лейкоцитами, активація клітин Купфера, мікронакопичення бурого пігменту (стрілки). Гематоксилін-еозин x250). Спостерігали появу круглоклітинної інфільтрації деяких портальних трактів, клітин у фазі мітотичного поділу. Крім того, спостерігали помітне коливання розміру ядер гепатоцитів, наявності збільшеної кількості ядерцев у них. Окремі гепатоцити трохи зменшені у розмірі, мали більш виражено еозинофільну цитоплазму, конденсацію хроматину у ядрі.

За повторних введень харчової добавки «Магнетофуд» у дозі 2500 мг/кг у печінковій паренхімі осередками або більш дифузно збільшився вміст круглоядерних лейкоцитів у гемокапілярах. Часто різні за розміром інфільтрати з цих клітин виявлялися у паренхімі часточок та у зоні деяких триад (рис. М.1.3 – після введення харчової добавки «Магнетофуд» у дозі 2500 мг/кг: збільшення вмісту круглоядерних лейкоцитів у просвіті синусоїдів; круглоклітинна інфільтрація портального тракту та у паренхімі часточки. Гематоксилін-еозин x200 та x400.). У кровоносних судинах видно крайове розташування клітин крові. Простежено збільшення гепатоцитів, що знаходилися у фазі поділу ядра, клітин з більш виразною еозинофільною цитоплазмою і пікнотичним ядром. Окремі з таких гепатоцитів мали ознаки каріорексісу. Виходячи з даних літератури, описанні вище клітини є апоптичними, які характеризуються зменшенням розміру, еозинофільною цитоплазми, мають початкові ознаки апоптотичного розпаду ядра (конденсація хроматину, фрагментація ядра).

Нирки. Після введення харчової добавки «Магнетофуд» у дозах 500 мг/кг і 2500 мг/кг гістологічна структура органу не змінюється відносно інтактного контролю. Чітко простежуються кірковий і мозковий шари. Ниркові клубочки мають нормальний розмір, клітинність капілярної мережі у межах норми. Проксимальні і дистальні частини каналців нефронів нормальної структури, епітелій без ознак дистрофії. Виразність розпушення апікальних відділів нефроцитів у дослідних та контрольних щурів візуально однаковий. Практично у всіх дослідних щурів спостерігали виразну повнокровність капілярної периканальцевої мережі внутрішньоорганних кровоносних судин, іноді в просвіті капілярів і судин видні круглоядерні лейкоцити (рис. М.1.4 – після введення харчової добавки «Магнетофуд» у дозі 500 мг/кг і 2500 мг/кг: ниркові клубочки, дистальні і проксимальні частини каналців нефронів без змін. Міжканальцева капілярна мережа повнокровна. Гематоксилін-еозин х200.). Прямі каналці і збиральні трубочки мозкового шару не змінені.

Легені. У інтактних щурів простежується нормальна будова органу. Альвеолярні ходи і мішечки звичайного (після розкриття груднини) вигляду. Структура бронхів збережена, морфологічних змін в них не помічено, порушень секреції епітелію бронхів та бронхіол не знайдено. Просвіт альвеол та бронхів пустий. Проліферативні прояви в структурах міжальвеолярних перегородок відсутні. Капілярна мережа стінок альвеол помірного кровонаповнення, лімфоцитарна реакція у стромі перибронхіального дерева помірна (рис. М.1.5 – гістоархітектоніка альвеолярних ходів та мішечків не порушена. Епітелій бронхів та бронхіол відповідає нормальному. Гематоксилін-еозин х100).

У щурів, яким вводили харчової добавки «Магнетофуд» у дозах 500 мг/кг і 2500 мг/кг, на тлі в цілому збереженому альвеолярному рисунку виявлені осередки дистелектазу (безповітряні) (рис.М. 1.6 – після введення ХДМ у дозі 500 мг/кг і 2500 мг/кг на тлі збереженого альвеолярного рисунку видні різні за розміром осередки дистелектазу. Гематоксилін-еозин х100). У

міжальвеолярних перегородках кровоносні капіляри виразно повнокровні, доволі часто спостерігали крововиливи, в самих перегородках збільшено клітинний вміст. На деяких мікропрепаратах видно відкладення глибок коричнево-чорного пігменту у перегородках, ділянках з дистелектазом, у місцях крововиливів. Місцями, ймовірно внаслідок подразнення від відкладення пігменту, у просвіті частини альвеол (міжальвеолярні перегородки таких альвеол розпушені) видно більш менш численні вільно розташовані клітини – злуцнені альвеолоцити, макрофаги (рис. М.1.7 – після введення ХДМ у дозах 500 мг/кг і 2500 мг/кг відкладення глибок пігменту у зонах крововиливу, вільно розташовані у просвіті альвеол злуцнені альвеолоцити та макрофаги (б). Гематоксилін-еозин х400). У кровоносних судинах видно круглоядерні лейкоцити, які мігрують у перивазальні простори.

Селезінка. У всіх дослідних і контрольних щурів розподіл на білу та червону пульпу чіткий. Лімфатичні вузлики звичайні за структурою, однорідні за станом у межах одного мікропрепарату. Ознак гіпер- чи гіпоплазії білої пульпи не виявлено. В червоній пульпі значна насиченість еритроцитами, багато ядерних форм клітин. Відкладення пігменту не спостерігали (рис. М.1.8 – після введення харчової добавки «Магнетофуд» у дозі 500 мг/кг і 2500 мг/кг стан білої та червоної пульпи звичайний. Гематоксилін-еозин х100).

Тимус у всіх щурів подано добре розвинутими часточками з чітким розподілом на кіркову та мозкову речовини. Об'єм кіркової речовини по часточкам в цілому перевищує мозкову. Щільність розташування кіркових та медулярних тимоцитів відповідав нормальному. Практично у всіх контрольних і дослідних тварин помічено помірний так званий малюнок "зоряного неба" – дрібні крапки просвітлення внаслідок налипання лімфоцитів на макрофаги – відповідь на антигенний вплив, у данному випадку харчової добавки «Магнетофуд». Тимічні тільця нечисленні, дрібні, деякі з них кистозно розширені (рис. М.1.9 – після введення харчової добавки

«Магнетофуд» у дозах 500 мг/кг і 2500 мг/кг нормальне співвідношення кіркової та мозкової речовини, помірний малюнок "зоряного неба". Гематоксилін-еозин x100).

Надпирники у всіх щурів без ознак реактивних змін у стані адренкортикоцитів різних зон кори. Співвідношення зон кори, візуально рівень вакуолізації цитоплазми клітин клубочкового та пучкового шарів дослідних щурів не відрізнялися від інтактних контрольних щурів. У мозковій речовині цитоплазма частини нейроендокриноцитів просвітлена, у інших – більш щільна еозинофільна, що відповідає різному фізіологічному стану клітин. Співвідношення нейроендокриноцитів різного функціонального статусу у дослідних щурів на погляд була на рівні інтактних щурів (рис. М.1.10 – після введення харчової добавки «Магнетофуд» у дозі 500 мг/кг і 2500 мг/кг гістоструктура різних зон коркової та мозкової речовини не змінена. Гематоксилін-еозин x100).

Серцевий м'яз. У інтактних щурів на мікропрепаратах встановлена типова картина міокарду, характерна для нормального стану. На поздовжніх зрізах простежується доволі щільна упаковка м'язових волокон, які мають вигляд єдиного масиву жмутків, що міняють свій напрямок. Розміри інтерстиціальних просторів не значні. Вміст в них сполучнотканинних клітин невеликий. Серцеві м'язові волокна звичайні за товщиною, рівномірно профарбовані. Кардіоміоцити у волокнах розташовано послідовно один за одним. Ядра кардіоміоцитів витягнутої або овальної форми, звичайні за розміром та локалізацією. Ядра нормохромні, з чіткою хроматиною субстанцією та ядерцем. Досить чітко видно поперечну покресленість міофібрил. На зрізах зустрічається значна кількість дрібних артеріальних та венозних судин, без ознак судинної та позасудинної патології (рис. М.1.11 – після введення харчової добавки «Магнетофуд» у дозі 500 мг/кг і 2500 мг/кг нормальний стан серцево-м'язових волокон; видно чітку поперечну покресленість міофібрил, нормохромні з чіткою хроматиною субстанцією і ядерцем ядра кардіоміоцитів. Гематоксилін-еозин x200 та x400).

Після введення харчової добавки «Магнетофуд» у дозі 500 мг/кг протягом 30 діб у міокарді щурів виявляються нечисленні ділянки з міоцитолізом. На таких ділянках забарвлення ядер кардіоміоцитів послаблено, міофібрили розбухлі, просвітлені, частково у стані розпаду, поперечна покресленість не визначається, забарвлення еозином значно слабше. Спостерігаються циркулярні порушення у вигляді капілярного і венозного повнокров'я, інтерстиціального набряку. На деяких місцях видно наявність великої кількості бурого пігменту. Виявлені ознаки вогнищового коагуляційного некрозу кардіоміоцитів. На місці фрагментів зруйнованих волокон простежено скупчення клітин круглоядерного інфільтрату та нечисленних сполучнотканинних клітин. Круглоядерні лейкоцити виявлялися у ендомізії волокон та у перивенозних просторах (рис. М.1.12 – після введення харчової добавки «Магнетофуд» у дозі 500 мг/кг: міоцитоліз, стаз еритроцитів у капілярах, повнокровність венозної судини, круглоядерні лейкоцити перивенозно, інтерстиціальний набряк, круглоклітинні елементи у ендомізії, випадіння бурого пігменту, клітинний інфільтрат, що заміщує загиблі кардіоміоцити. Гематоксилін-еозин x250, x200 та x150).

Після введення харчової добавки «Магнетофуд» у дозі 2500 мг/кг повнокровність капілярів у ендомізії часто виразно підвищена, іноді видні діapedезні крововиливи, судинна стінка мікрососудів ендомізії потовщена. У більш «старих» осередках колишнього некрозу кардіоміоцитів фрагменти волокон заміщуються фіброзною тканиною, в якій видно тонкі колагенові волоконця, фібробласти. У «свіжих» – загиблі кардіоміоцити заміщені круглоядерними лейкоцитами. Накопичення цих клітин на деяких мікропрепаратах видно і у субепікардіально (рис. М.1.13 – після введення харчової добавки «Магнетофуд» у дозі 2500 мг/кг: виразна повнокровність капілярів ендомізії, потовщення судинної стінки мікрососудів ендомізії, початок фіброзу на місці загибелі фрагментів волокон, випадіння бурого пігменту, клітинні інфільтрати, що заміщують загиблі кардіоміоцити, круглоядерні лейкоцити субепікардіально. Гематоксилін-еозин x200, x400 та x150).

Підшлункова залоза. У щурів дослідних груп порівняно з інтактним контролем помітних змін у структурі та функціональній активності залозистої тканини не помічено. У екзокринній складовій ацинарні клітини типового виду, співвідношення зимогенутримуючої центральної та ядроутримуючої периферичної зон достатньо стабільне. У одного щура, якому харчову добавку «Магнетофуд» вводили у дозі 500 мг/кг виявлена вогнищева вакуолізація ацинарних клітин. Панкреатичні острівці у всіх щурів чисельні, типові за розміром і формою, клітинна насиченість їх достатня. (рис. М.1.14 – після введення харчової добавки «Магнетофуд» у дозах 500 мг/кг і 2500 мг/кг нормальний стан залозистої тканини. Гематоксилін-еозин x100. Циркуляторних розладів та накопичення пігменту не спостерігали).

Яєчник. У всіх дослідних і контрольних самок щурів поверхня органу покрита незмінним гермінативним (зачатковим) епітелієм. Строма інтактна, оточує примордіальні фолікули звичайного вигляду, а також фолікули на різних стадіях циклу: первинні, вторинні та жовті тіла різного ступеня інволюції. Гіперемія судин, кістозоподібне переродження фолікулів відсутні. Рівень атрезії фолікулів візуально у дослідних самок був приблизно на тому ж рівні, що у контрольних.

Яєчки. Мікроскопічне дослідження тестикулярної тканини не виявило помітних на світлооптичному рівні змін у структурній організації яєчок самців щурів дослідних груп порівняно з інтактним контролем. Сім'яні каналці мали округлу чи овальну форму, містили всі типи сперматогенних клітин, що розташовувалися правильними концентричними шарами. Клітинні асоціації, які видні у епітелію сім'яних каналців, типові. Морфологічних порушень основних соматичних клітин яєчка – клітин Сертолі та клітин Лейдіга не спостерігали.

Стравохід. У всіх щурів слизова оболонка вкрита багат шаровим плоским зроговілим епітелієм. Роговий шар розпушено, поверхневій зоні його потужно базифільно пофарбовано. Ознаки подразнення, порушення

цілісності, запалення як у самій слизовій, так і підслизовій відсутні. На деяких мікропрепаратах у складках слизової видно залишки маси харчової добавки «Магнетофуд», що вводили під час експерименту.

Слизова шлунка. Як показало мікроскопічне дослідження поверхня слизової оболонки залозистого шлунка у інтактних щурів вкрита одношаровим циліндричним епітелієм. Шлункові ямки (мікроскопічні заглиблення поверхні) дещо різняться за глибиною в залежності від відділу. Власні залози шлунка щільно розташовані, довгі. В залозистих трубках візуалізуються слизові, парієтальні і головні клітини. Територіальне розташування та взаємовідношення залозистих клітин звичайне, секреторна активність візуально у межах норми. Пілоричні залози розташовані доволі пухко, сполучнотканинні прошарки між ними більш виразні. Залози вистелені одним шаром клітин з виразною світлою широкою апікальною зоною. Між зоною дна та пілоричною ділянкою у препілоричній зоні розташовані так звані інтермедіарні залози, які за своєю будовою нагадують як власні, так і пілоричні залози. Клітинні елементи у цих залозах знаходяться у інших кількісних співвідношеннях, ніж у власних: в них більше додаткових клітин, головні клітини значно редуковані, парієтальні клітини мають в основному теж розташування, що і у власних залозах. Стан мікроциркуляторного русла і строми у всіх досліджених ділянках шлунка без особливостей (рис. М.1.15 – після введення харчової добавки «Магнетофуд» у дозах 500 мг/кг і 2500 мг/кг нормальний стан слизової оболонки. Гематоксилін-еозинх200).

У щурів, яким вводили харчову добавку «Магнетофуд» у дозі 500 мг/кг, виявлені виразне розширення і повнокровність субепітеліальної капілярної мережі, підвищена десквамація епітелію, формування поверхневих ерозій. Описані вище ознаки після введення біодобавки у дозі 2500 мг/кг більш виразні. Практично у всіх дослідних щурів простежено помірне збільшення клітинної насиченості строми у зонах пошкодження епітелію, часто – розширення просвіту залозистих трубок (рис. М.1.16 – після

введення харчової добавки «Магнетофуд» у дозах 500 мг/кг і 2500 мг/кг повнокровність субепітеліальної капілярної мережі. Гематоксилін-еозин х200).

Слизова оболонка ділянки **порожньої кишки** у інтактних щурів подана численними ворсинками помірно однорідними за висотою, пальцеподібною, ріже списоподібною форми, які вкриті одним шаром кишкових епітеліальних клітин з облямівкою. Епітеліальні клітини високі циліндричні, ядра овальні, розташовані на одному рівні, ближче до базального полюсу, облямівка на апікальному полюсі чітка. Серед кишкових епітеліальних клітин у помірній кількості присутні келихоподібні клітини. Основа (строма) ворсинок складається з пухкої волокнистої тканини та численних клітин лмфоїдного ряду, плазматичних клітин. Межа між сполучною тканиною строми та базальною мембраною епітелію достатньо чітка.

Спостерігався помірно виражений лейкопедез епітелію (проникнення лімфоцитів у клітини епітелію), повнокровність капілярної мережі помірна. У підвалині ворсинок у власній пластинці слизової розміщені достатньо глибокі кишкові крипти, у верхніх відділах яких серед епітеліальних клітин теж присутні келихоподібні клітини. По всій глибині крипт видні епітеліальні клітини у стані поділу

Після введення харчової добавки «Магнетофуд» у дозі 500 мг/кг помітних змін у стані слизової оболонки порожньої кишки щурів не спостерігали. Ентероцити високі циліндричні, кишкові крипти не заглиблені, не розширені, візуально чисельність келихоподібних клітин у ворсинках та криптах не змінилася. Клітинний склад строми ворсинок також стабільний. Відмічено лише помірний набряк строми частини ворсинок, місцями – немов би нагромадження ядер епітелію.

Збільшення дози харчової добавки до 2500 мг/кг також не змінювало структурну організацію слизової кишки – розмір, форма ворсинок, співвідношення довжини ворсинок і глибини крипт не змінюються, втім, у ворсинках спостерігали розмитість контурів базальної мембрани епітелію і

прилеглої до неї сполучної тканини строми. Місцями збільшено виразність лейкопедезу епітелію, не різко виражене зміщення ядер клітин у напрямку просвіту кишки, облямівка на апікальному полюсі клітин не чітка (особливо на боковій поверхні ворсинок), зорозовано збільшено келихоподібних клітин. Залишається і певний набряк строми ворсинок.

Пряма кишка. У всіх дослідних і контрольних щурів слизова оболонка вистелена поверхневими епітеліальними клітинами високої кубічної або циліндричної форми, з чіткою кутикулярною облямівкою. Ядра овальні, розташовані у базальній частині клітин, на одному рівні.

Вміст келихоподібних клітин серед епітеліальних у дослідних і у контрольних щурів зорозовано приблизно на одному рівні. Кишкові крипти помірної глибини, щільність розташування їх звичайна.

Зона мітозів (гермінативна зона) обмежена дном крипт, просвіт крипт помірний. Розподіл келихоподібних клітин по довжині крипт рівномірний, кількість їх доволі значна, численність їх у криптах збільшена відносно поверхневого епітелію. Строма слизової оболонки насичена лімфоїдними і еозинофільними клітинами.

Підсумовуючи результати якого, можна зробити наступні узагальнення. Внутрішньошлункове введення ХДМ у дозах 500 мг/кг і 2500 мг/кг призводить до надлишкового надходження заліза у організм щурів. Надлишок заліза депонується у легенях, печінці, серцевому м'язі у вигляді різних за виразністю мас пігменту гемосидерину.

Найбільше накопичення пігменту простежено на мікропрепаратах легень тварин. Надлишкове надходження заліза у печінці сприяє напруженню гепатоцитів, створенню умов для “активації” апоптозу клітин, у міокарді щурів розвиваються дистрофічно-деструктивні зміни, у слизовій оболонці шлунка введення ХДМ викликає пошкодження покривно-ямкового епітелію, формування поверхневих ерозій. У всіх цих органах простежується активація макрофагів, дисциркуляторні розлади різного ступеня виразності. Виразність цих змін в певній мірі залежить від дози харчової добавки. У

інших органах (тимусі, селезінці, підшлунковій залозі, наднирниках, гонадах, слизовій стравоходу, порожньої та прямої кишки) змін структурної організації не виявлено.

Отримані нами результати у певній мірі співвідносяться з даними інших авторів, які досліджували вплив наночастинок різних металів на організм тварин та людини.

Так, у дослідженнях на мишах і людях показано, що наночастинок TiO_2 (розмір 150-500 нм), отримані з їжею, проникають в кров і кумулюються у печінці та селезінці.

На щурах показано можливість попадання наночастинок магнетиту з травної системи в лімфо- і кровообіг. Нанорозмірні частинки елімінуються різними способами в залежності від їх сорбційної здатності, хімічного складу, поверхневих і фізико-хімічних властивостей.

Наприклад, в легенях, шкірі, шлунково-кишковому тракті вони захоплюються фагоцитуючими клітинами, як у вигляді вільних частинок, так і в формі агломератів. Поодинокі та агреговані наночастинок магнетиту видаляються з циркуляції клітинами системи МНФ і акумулюються в печінці. У дослідженнях Oberdorster G. зі співавторами та Wang, J. зі співавторами показано, що одноразове пероральне введення наночастинок діоксиду титану розміром 25 нм і 80 нм в дозі 5000 мг/кг викликає у мишей некроз гепатоцитів і збільшення печінки (80 нм), накопичення в селезінці, нирках і легенях, а також підвищення активності ЛДГ в сироватці крові (25 нм).

За результатами нашого дослідження введення ХДМ не призводило до патологічних змін печінкових трансаміназ та інших біохімічних показників, що свідчить про зворотність визначених змін гістоструктури печінки, легень, та серцевого м'язу.

Отже, вивчено гістоструктури внутрішніх органів білих щурів за умов перорального 10-денного введення ХДМ. Макроскопічний огляд показав відсутність патологічних змін внутрішніх органів мишей та щурів обох статей.

Висновки за розділом 6

1. Встановлено, що ХДМ не вбудовується в метаболізм; за внутрішньошлункового введення мишам обох статей у дозі 5000 мг/кг не чинить токсичної дії та не призводить до загибелі мишей. За класифікацією по токсичності ХДМ відноситься до 4 класу токсичності (малотоксичні речовини, $LD_{50} > 5000$ мг/кг);

2. За повторних введенень протягом 30 діб у дозах 500 і 2500 мг/кг, ХДМ не чинить токсичного впливу на гемостаз та функціональний стан печінки, нирок, серця і ЦНС білих щурів обох статей. Встановлений цитопротекторний ефект добавки в малих концентраціях введення (0,02 мг/мл і 0,002 мг/мл) є додатковим підтвердженням антиоксидатної активності ХДМ.

3. На гістологічному рівні показано накопичення надлишку заліза у легенях, печінці, серцевому м'язі у вигляді мас пігменту гемосидерину. Це викликає формування ряду захисних реакцій організму, ознакою яких є активація макрофагів, дисциркуляторні розлади різного ступеня виразності в залежності від дози. Найбільше накопичення пігменту спостерігається на мікропрепаратах легень тварин.

4. Встановлено, що найбільш чутливими органами щодо дії ХДМ є легені, серце, нирки та печінка. Слід зауважити, що токсичність ХДМ за повторних введенень вивчали у достатньо великих дозах, що складають 1/2 та 1/10 від LD_{50} . Зважаючи на те, що введення ХДМ у цих дозах не призводило до патологічних змін печінкових трансаміназ та інших біохімічних показників, складу крові та гемостазу, не порушувало параметри ЕКГ та поведінкові реакції тварин, не впливало на КМ внутрішніх органів та сприяло позитивному приросту маси тіла тварин, можна вважати, що визначені зміни гістоструктури тканин різних органів є функціональними та зворотними.

РОЗДІЛ 7

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА SWOT-АНАЛІЗ ХАРЧОВОЇ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ХАРЧОВОЇ ДОБАВКИ «МАГНЕТОФУД»

Упровадження наукових результатів у виробництво потребує попереднього оцінювання розроблених інноваційних рішень. Вивчення критеріїв, показників і методичних засад оцінювання інноваційних розробок, наведених у працях [431–433], дозволило зробити висновок про складність їх використання для оцінювання ефективності інноваційних технологій харчової продукції, зокрема харчової продукції з використанням наночастинок, без певної адаптації з огляду на особливості інновацій у харчовій промисловості та різноманітність ефектів інноваційної розробки.

7.1. Оцінка ефективності та рентабельності інноваційної харчової продукції з використанням харчової добавки «Магнетофуд»

Оскільки інноваційні технології харчової продукції з використанням ХДМ мають багатоаспектний характер, а їх результати є предметом зацікавлення значної кількості суб'єктів (виробників, споживачів, інвесторів, наукових установ та ін.), для висновку щодо доцільності впровадження цих технологій запропоновано використовувати показники наукової та науково-технічної результативності, соціальної та економічної ефективності (табл. 7.1, рис. 7.1), що дає розуміння ефективності інноваційної розробки як узагальнюючої характеристики, яка складається з певних елементів (табл. 7.1) та відображає інтереси ключових учасників реалізації інноваційного процесу.

Одним із результатів інноваційної розробки є досягнення наукового ефекту, що характеризується одержанням нових наукових знань [431]. З

огляду на специфіку об'єкта оцінювання для визначення наукової цінності розробки рекомендовано розрахунок показників, що відображають науковий рівень, новизну та глибину наукових розробок. Разом із зазначеними показниками, що використовують у науковій літературі [432] для оцінювання наукової результативності розробки, запропоновано використання показника наукоємності продукції, що є підтвердженням об'єктивності наукового результату інноваційних технологій харчової продукції.

Таблиця 7.1

Критерії та показники для оцінювання інноваційних технологій харчової продукції

Критерій оцінювання	Показник	Зміст
Наукова результативність	Науковий рівень	Характеризує рівень одержаних наукових знань
	Новизна	Відображає рівень новизни результатів порівняно з існуючими аналогами
	Глибина наукових розробок	Характеризує склад і обсяг проведених досліджень
	Наукоємність продукції	Відображає переваги продукції з точки зору її унікальності
Науково-технічна результативність	Перспективність використання	Відображає поширення результатів дослідження за видами економічної діяльності
	Масштаб упровадження	Відображає масштаб поширення результатів дослідження за рівнями економіки
	Період реалізації	Відображає період упровадження результатів
	Ступінь реалізації	Відображає спосіб формалізації результату, його оприлюднення, упровадження
Соціальна ефективність	Цінність продукції для споживача	Відображає сукупність вигід, які одержить споживач в разі придбання продукції
Економічна ефективність	Рентабельність інноваційної продукції	Відображає прибуток, що припадає на одиницю витрат, пов'язаних із виробництвом і реалізацією продукції

Примітка. Розроблено на основі [431–433].

З огляду на наукові публікації з питань оцінювання наукоємної продукції [432–433] умовою визнання її такою є перевищення частки витрат на НДР за інноваційними виробами порівняно із середніми значеннями аналогічних витрат у вартості продукції інших виробництв або перевищення

трудоемності інноваційної продукції її граничного значення за певними секторами харчової промисловості, економіки в цілому.

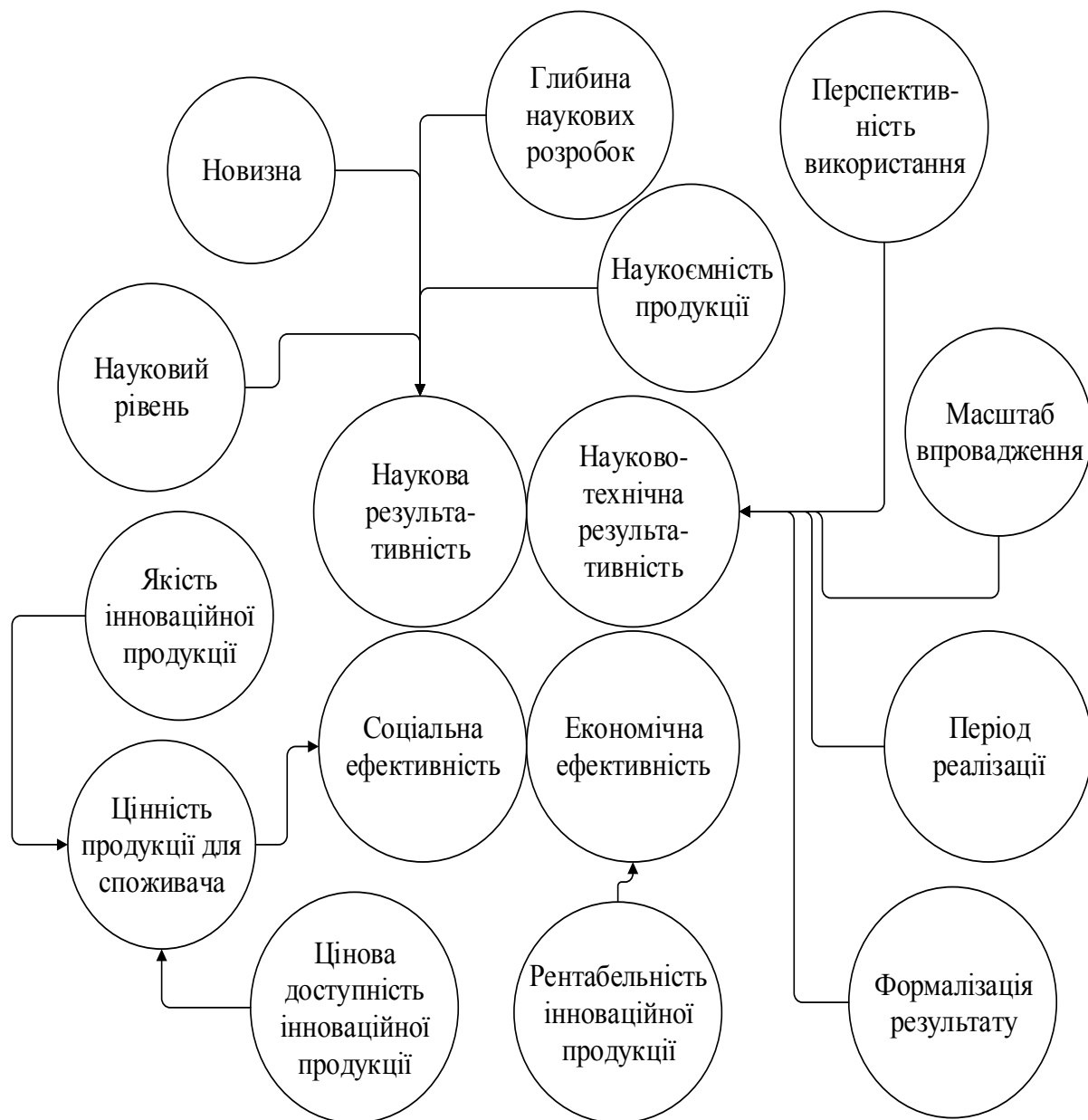


Рис. 7.1. Критерії та показники ефективності інноваційних технологій харчової продукції (узагальнено на основі [432–433])

Спираючись на публікації [431–433], для одиничних показників наукової та науково-технічної результативності інноваційних технологій харчової продукції з використанням харчової добавки «Магнетофуд» (ХДМ) обґрунтовано лінгвістичні ознаки, переведення яких у кількісну систему

вимірювання рекомендовано здійснювати з дотриманням трирівневої шкали бальної оцінки (табл. 7.2).

Таблиця 7.2

Характеристика та шкала оцінювання наукової й науково-технічної результативності інноваційних технологій харчової продукції

Показник	Лінгвістична оцінка		
	високий рівень	середній рівень	низький рівень
	Шкала для оцінювання		
	3 бали	2 бали	1 бал
Наукова результативність			
Науковий рівень	Створено новий напрям наукових знань і досліджень	Удосконалено існуючі методики	Підтверджено існуючі теоретичні положення
Новизна	Принципово нові результати	Методи, способи, що дозволяють створити нову продукцію	Рішення на основі простих узагальнень
Глибина наукових розробок	Гіпотези теоретично обґрунтовані та перевірені на великому обсязі експериментальних даних	Гіпотези теоретично обґрунтовані та перевірені на невеликому обсязі експериментальних даних	Гіпотези теоретично обґрунтовані
Наукоємність продукції	Коефіцієнт наукоємності продукції перевищує базове значення	Коефіцієнт наукоємності продукції відповідає базовому значенню	Коефіцієнт наукоємності продукції менший, ніж базове значення
Науково-технічна результативність			
Перспективність використання	Результати можуть знайти застосування в багатьох наукових напрямках	Результати можуть бути використані для розвитку певного наукового напрямку	Результати можуть бути використані під час прикладних досліджень
Масштаб упровадження	Національна, світова економіка	Регіональний ринок	Локальний ринок, окремі підприємства
Період реалізації	До 3 років	Від 3 до 5 років	Понад 5 років
Ступінь реалізації	Результати оприлюднені у вигляді наукових повідомлень, формалізовані у вигляді нормативно-технічної документації, упроваджені у практичну діяльність	Результати формалізовані у вигляді нормативно-технічної документації	Результати оприлюднені у вигляді наукових повідомлень

Примітка. Розроблено за даними [431, 432].

Коефіцієнти наукової (K_s) та науково-технічної результативності (K_{st}) розраховуються за формулами (7.1) та (7.2):

$$K_s = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n B_{sij}}{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n B_{sij\max}}, \quad (7.1)$$

$$K_{st} = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{p=1}^m B_{stpj}}{\sum_{j=1}^k \sum_{p=1}^m B_{stpj\max}}, \quad (7.2)$$

де K_s – коефіцієнт наукової результативності;

K_{st} – коефіцієнт науково-технічної результативності;

B_{sij} – фактичне значення j -го експерта за i -м показником наукової результативності, бал;

$B_{sij\max}$ – максимальне значення j -го експерта за i -м показником наукової результативності, бал;

B_{stpj} – фактичне значення j -го експерта за p -м показником науково-технічної результативності, бал;

$B_{stpj\max}$ – максимальне значення j -го експерта за p -м показником наукової результативності, бал;

n – кількість показників наукової результативності, одиниць;

m – кількість показників науково-технічної результативності, одиниць;

k – чисельність експертів, осіб.

З огляду на абсолютні значення коефіцієнтів для ідентифікації рівня наукової та науково-технічної результативності інноваційних технологій харчової продукції рекомендовано дотримання певних умов (табл. 7.3). При цьому, важливим етапом оцінювання результатів наукового дослідження є визначення соціальних наслідків його впровадження у практичну діяльність, що відображається у змінах умов діяльності людини в суспільстві, зокрема умов праці та побуту, стану довкілля тощо. Ураховуючи результати

інноваційних технологій, соціальний ефект від їх упровадження розглянуто через показники якості й доступності інноваційної продукції за ціною, що відповідає показникам, що використовуються для оцінювання якості життя населення в Україні [432, 433].

Таблиця 7.3

Умови для ідентифікації рівня результативності інноваційних технологій харчової продукції

Значення коефіцієнта	Ідентифікація рівня результативності інноваційних технологій харчової продукції
$0 \leq K_s < 0,33$	Низький рівень результативності інноваційних технологій харчової продукції
$0 \leq K_{st} < 0,33$	
$0,34 \leq K_s < 0,66$	Середній рівень результативності інноваційних технологій харчової продукції
$0,34 \leq K_{st} < 0,66$	
$0,67 \leq K_s \leq 1$	Високий рівень результативності інноваційних технологій харчової продукції
$0,67 \leq K_{st} \leq 1$	

**Примітка. Розроблено самостійно*

Для оцінювання якості й доступності інноваційної харчової продукції рекомендовано застосувати трибальну шкалу оцінювання, згідно з якою високе значення характеристики відповідає 3 балам, відсутність прояву характеристики – 0 балів. Коефіцієнти якості (K_q) та цінової доступності продукції (K_p) визначено за формулами (7.3), (7.4) та (7.5). Співвідношення коефіцієнтів якості та цінової доступності відображає цінність інноваційної продукції для споживача за характеристиками «якість-ціна»:

$$K_{qr} = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{x=1}^z B_{xjr}}{\sum_{j=1}^k \sum_{x=1}^z B_{xjr \max}}, \quad (7.3)$$

$$K_{pr} = \frac{P_r}{P_{cr}}, \quad (7.4)$$

$$K_v = \frac{K_{qr}}{K_{pr}}, \quad (7.5)$$

де K_{qr} – коефіцієнт якості r -ї продукції;

K_{pr} – коефіцієнт цінової доступності r -ї продукції;

K_v – цінність продукції для споживача, коефіцієнт;

$B_{x_{rj}}$ – фактичне значення якості r -ї продукції за x -м показником j -го експерта, бал;

$B_{x_{rj\max}}$ – максимальне значення якості r -ї продукції за x -м показником j -го експерта, бал;

z – кількість показників якості, одиниць;

P_r – ціна r -ї продукції, грошові одиниці;

P_{cr} – ціна продукту-аналога r -ї продукції, грошові одиниці.

З урахуванням значення коефіцієнтів якості та доступності продукції за ціною визначено умови для встановлення їх рівня (табл. 7.4).

Таблиця 7.4

Умови для оцінювання харчової продукції за критерієм її цінності для споживача

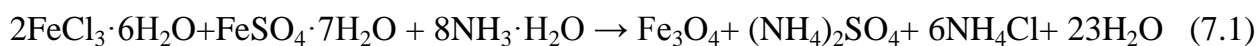
Умови	Висновок
$K_v > 1,0$	висока цінність інноваційної продукції для споживача; вигоди, що отримує споживач перевищують витрати з придбання продукції
$K_v = 1,0$	невисока цінність інноваційної продукції для споживача; вигоди, що отримує споживач відповідають витратам з придбання продукції
$K_v < 1,0$	низька цінність інноваційної продукції для споживача; вигоди, що отримує споживач менші, ніж витрати з придбання продукції

**Примітка. Розроблено самостійно*

Упровадження в практичну діяльність інноваційних технологій забезпечує поточні економічні вигоди у вигляді приросту прибутку, що свідчить про економічний ефект наукових розробок. Додатковий економічний ефект, що отримає виробник в разі реалізації нової продукції свідчатиме про доцільність впровадження інноваційної технології у виробництво.

На основі обґрунтованої системи показників (табл. 7.1 та табл. 7.2) здійснено оцінювання інноваційних технологій харчової продукції з використанням ХДМ, за результатами якого зроблено висновок про високий

рівень ефективності зазначеної інноваційної розробки. Щодо наукової результативності слід відзначити інноваційність технології ХДМ, що полягає у способі її виробництва. ХДМ одержано методом хімічної конденсації внаслідок змішування водних розчинів солей феруму (II) і (III) з 25% водним розчином амонію гідроксиду (рН = 9–10) за реакцією (7.1):



Отриманий за цих умов осад чорного кольору відповідає хімічному складу Fe_3O_4 або $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ і є подвійним оксидом дво- та тривалентного феруму (Fe_3O_4 або $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) зі структурою «зворотної» шпінелі. Зміна умов синтезу (концентрації вхідних речовин, температури, інтенсивності перемішування, швидкості додавання NH_4OH) дає можливість варіювати розміри частинок ХДМ від 10 нм до 150 нм і більше. Створення нового науково-практичного напрямку харчової науки й принципово нові результати підтверджено патентами на ХДМ та спосіб її одержання (патент на корисну модель UA № 126502, МПК (2016.01) А 23L 13/40, А23L 33/10; патент на корисну модель UA № 126507, МПК (2018.01) В 82У 40/00, В82В 1/00, В82В 3/00).

Результати наукової роботи мають значний потенціал використання не лише на підприємствах харчової індустрії, а й у сфері виробництва косметичної та фармацевтичної продукції, харчових продуктів лікувальної та профілактичної дії, що свідчить про перспективи використання одержаних наукових результатів у багатьох наукових напрямках і видах економічної діяльності.

Інноваційними є не тільки зазначені теоретичні наукові результати, але й доведені до практичного впровадження в господарську діяльність підприємств харчової промисловості нові види продуктів, що мають високий рівень наукоємності (Додатки Т. 1, Т.2 та рис. 7.2, а).

Наукоємність продукції, виготовленої за розробленими технологіями, визначена на рівні 0,78...1,09%, що в 1,05...1,50 разу перевищує аналогічні характеристики за галузями економіки в Україні (0,75%) [432].

Для підтвердження наукової та науково-технічної результативності розробленої технології використано результати опитування фахівців у галузі харчових технологій, чисельність яких визначена з урахуванням вимог до організації експертного оцінювання [431, 432]. З огляду на умови (табл. 7.2, а та табл. 7.3) та отримані результати оцінювання розраховано коефіцієнти наукової та науково-технічної результативності інноваційних технологій харчової продукції з використанням наночастинок ХДМ (Додатки Т.1, Т.2, Т.3, табл. 7.5).

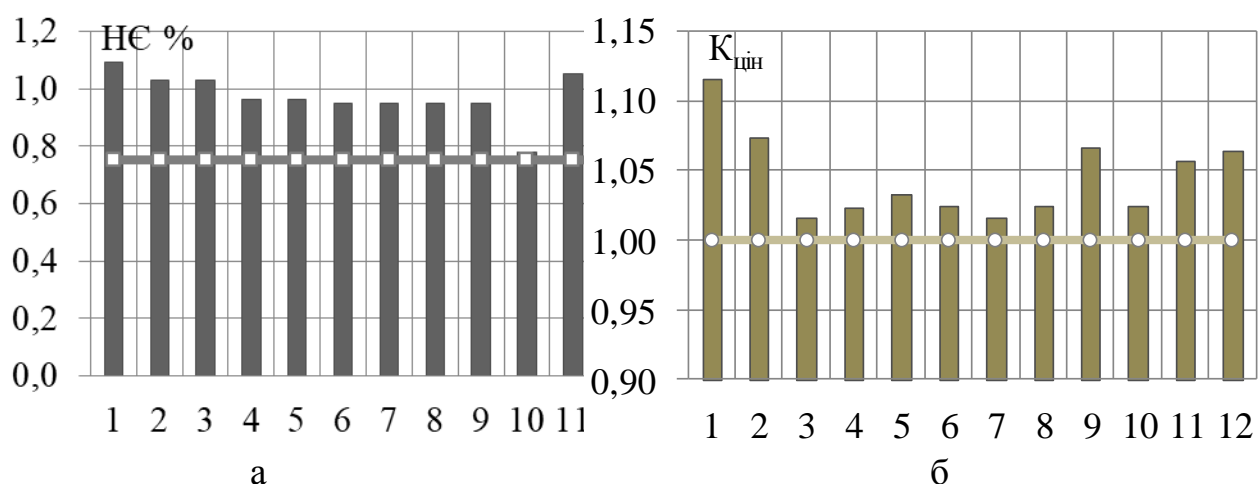


Рис. 7.2. Наукоємність НЄ (а) та коефіцієнт цінності $K_{\text{цін}}$ (б) харчової продукції з використанням ХДМ (розраховано самостійно) (1 – житньо-пшеничний хліб «Харківський родичок», 2 – котлети «Ситні», 3 – біфштекси з яловичини «Слобожанські», 4 – вівсяне печиво «Козак», 5 – заварні пряники «Харківські», 6 – формовий желейний мармелад на агарі «Ранок», 7 – формовий желейний мармелад на пектині «Веселка», 8 – біло-рожевий зефір на агарі «Весна», 9 – біло-рожевий зефір на пектині «Літо», 10 – ягідно-фруктовий мус «Малинка», 11 – ягідно-фруктовий самбук «Ягідка», 12 – сирковий десерт «Слоненя»).

За розрахунками ці коефіцієнти становили 0,83 та 0,84 пункту відповідно, що свідчить про високий рівень наукової та науково-технічної результативності зазначених інноваційних технологій. Найбільш високо експерти оцінили наукоємність і перспективність використання результатів. Максимальні значення за цими напрямками досягли 0,88 та 0,90 пункту відповідно.

Наукова ідея виробництва ХДМ методом хімічної конденсації реалізована в новому технологічному процесі виробництва цієї добавки та новій харчовій продукції.

Таблиця 7. 5

Результати експертної оцінки наукової та науково-технічної результативності інноваційних технологій харчової продукції з використанням харчової добавки «Магнетофуд»

Показник	Значення, бал		Коефіцієнт
	максимальне	фактичне	
<i>Наукова результативність</i>			
Науковий рівень	3,0	2,4	0,81
Новизна	3,0	2,4	0,79
Глибина і ступінь поширення ідей	3,0	2,5	0,83
Наукоємність продукції	3,0	2,6	0,88
Разом	12,0	9,9	0,83
У середньому	3,0	2,5	0,83
<i>Науково-технічна результативність</i>			
Перспективність використання	3,0	2,7	0,90
Масштаб упровадження	3,0	2,5	0,83
Період реалізації	3,0	2,4	0,81
Ступінь реалізації	3,0	2,5	0,83
Разом	12,0	10,1	0,84
У середньому	3,0	2,5	0,84

**Примітка. Розраховано самостійно*

Слід зазначити, що ХДМ має певні функціонально-технологічні властивості: сорбційні, емульгувальні, структуроутворювальні, стабілізуючі, водо- і жирозв'язувальні, водо- і жирутримувальні, що позитивно впливає на якісні характеристики харчової продукції та формування нових функціонально-технологічних властивостей харчових систем, зокрема як покращувач хлібобулочної, м'ясної, молочної та кондитерської продукції. ХДМ може застосовуватися для подовження терміну зберігання продуктів, оскільки має бактеріостатичні й антиоксидантні властивості.

На базі інноваційної ідеї харчових технологій із використанням наночастинок розроблено інноваційні продукти, що характеризуються високою якістю та ціною доступністю. Розрахунки свідчать про високі

споживчі властивості інноваційної продукції та її доступність для споживачів. Співвідношення коефіцієнтів якості до ціни перевищує 1,0, що свідчить про високу цінність інноваційної продукції для споживача (Додатки Т.3–Т.5 та рис. 7.2, б).

Наукове обґрунтування виробництва харчової продукції з використанням ХДМ дає можливість одержати нові харчові продукти, які вирізняються не тільки високими якісними характеристиками, але й показниками додаткового прибутку і рентабельності.

Розрахунок відпускних цін на розроблені нові вироби та їх порівняння з цінами на продукцію, виготовлену за традиційною технологією, дозволив зробити висновок, що внаслідок використання харчової добавки «Магнетофуд», яка зумовлює збільшення виходу готової продукції, витрати на сировину і матеріали на нові вироби менші порівняно з продуктами-аналогами, що за інших рівних умов зумовлює приріст прибутку і збільшення рентабельності продукції (Додатки Т.5, Т.6 та табл. 7.6).

Таблиця 7.6

**Економічна ефективність упровадження у виробництво
інноваційної продукції**

Продукція	Приріст прибутку, тис. грн / 1 т продукції	Приріст рентабельності, %
1	2	3
Житньо-пшеничний хліб «Харківський родничок»	0,2	1,4
Котлети «Ситні»	3,1	5,3
Біфштекс із яловичини «Слобожанський»	4,4	5,4
Вівсяне печиво «Козак»	1,4	4,5
Пряники «Харківські»	0,8	3,2
Формовий желейний мармелад «Ранок» на агарі	0,2	0,8
Формовий желейний мармелад «Веселка» на пектині	0,4	1,0
Біло-рожевий зефір «Весна» на агарі	0,4	0,2

Продовження таблиці 7.6

1	2	3
Біло-рожевий зефір «Літо» на пектині	0,1	0,4
Ягідно-плодовий мус «Малинка»	0,6	0,5
Ягідно-плодовий самбук «Ягідка»	1,8	–
Сирковий десерт «Слоненя»	0,1	–

**Примітка. Розраховано самостійно*

За розрахунками ціна розробленої інноваційної продукції відповідає цінам на продукти-аналоги, що з урахуванням більш високих якісних характеристик дає компанії-виробнику можливість збільшити рентабельність інноваційної продукції на 0,2...5,4% та отримати додатковий прибуток від її реалізації в розмірі 0,1...4,4 тис. грн на кожні 1000 кг.

Значущим для впровадження у виробництво інноваційних розробок є попереднє оцінювання інноваційних рішень з огляду на їх перспективність. Це забезпечить виробника від втрат у разі інвестування коштів у виробництво продуктів, що, можливо, не будуть сприйняті ринком та дає можливість сформулювати ефективну стратегію просування інноваційної продукції.

7.2. SWOT-аналіз інноваційної продукції з харчовою добавкою «Магнетофуд»

Одним із сучасних інструментів обґрунтування управлінських рішень щодо просування товару на ринку є SWOT-аналіз. Це один із найбільш поширених методів дослідження, що використовується науковцями для визначення конкурентних переваг і формування стратегічних пріоритетів розвитку певного об'єкта управління. Зазвичай SWOT-аналіз розглядають як інструмент якісного аналізу, основу якого становлять експертні висновки щодо сильних і слабких сторін, можливостей і загроз підприємства, окремих його підрозділів, регіону, галузі тощо. Водночас у деяких працях наведено результати кількісного оцінювання загроз і можливостей [431–433], а також

практики SWOT-аналізу продукції [431]. Спираючись на розробки, наведені в працях [431, 432], SWOT-аналіз інноваційної продукції з використанням харчової добавки «Магнетофуд» проведено за такими етапами (рис. 7.3).

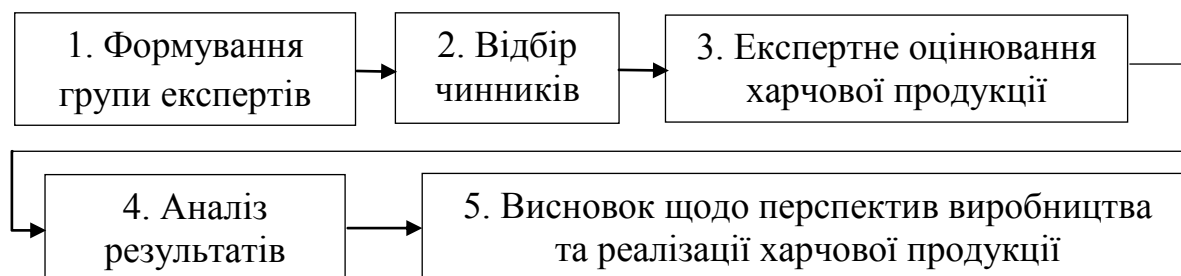


Рис. 7.3. Послідовність SWOT-аналізу харчової продукції (узагальнено на основі [431–433])

1. Формування групи експертів. Для визначення конкурентних переваг інноваційної продукції з використанням харчової добавки «Магнетофуд» та чинників зовнішнього середовища, що визначають перспективи виробництва й реалізації цієї продукції, сформовано групу експертів, до складу якої включено фахівців галузі харчових технологій. Кількість експертів (m) визначено за такою залежністю (7.6):

$$m = \frac{t_{\alpha}^2}{\varepsilon^2}, \quad (7.6)$$

де m – кількість експертів, осіб;

t_{α} – табличне значення відповідно до прийнятної довірчої ймовірності α ;

α – довірча ймовірність, %;

ε – гранично допустима помилка.

Для визначення компетентності експертів використано методи анкетного опитування та самооцінки. До анкети були включені питання щодо професійного рівня, науково-дослідної роботи та досвіду роботи. Для самооцінки запропоновано питання щодо обізнаності експертів з розвитку ринку нанотехнологій і нанопродуктів у світі та Україні, чинників, що впливають на перспективи виробництва та реалізації харчової продукції (Додатки Т. 7, Т.8, Т.9). Узагальнений коефіцієнт компетентності експертів

(0,83) засвідчив достатній ступінь відповідності сформованої групи спеціалістів для експертного оцінювання перспектив упровадження інноваційної продукції з використанням харчової добавки «Магнетофуд».

2. *Відбір чинників.* Для обґрунтування перспектив реалізації інноваційної продукції на ринку проведено контент-аналіз наукової літератури, унаслідок якого сформовано перелік основних характеристик для оцінки харчової продукції. Відібрані експертами характеристики сильних і слабких сторін інноваційної продукції, а також загрози та можливості зовнішнього середовища щодо інноваційної продукції з використанням харчової добавки «Магнетофуд» наведено в табл. 7.7.

Таблиця 7.7

**Матриця SWOT-аналізу інноваційної продукції
з використанням харчової добавки «Магнетофуд»**

Сильні сторони	Слабкі сторони
Унікальність пропозиції. Можливість додаткового прибутку для виробника. Патентна захищеність. Доступна ціна	Низький рівень поінформованості споживачів про нові продукти та їх переваги. Ризики впровадження нової продукції для виробників
Потенційні можливості	Загрози
Значний попит на впровадження результатів нанодосліджень у сферу харчування. Зростання ринку нанотехнологій та нанопродукції. Підвищення культури взаємодії бізнесу та науки з питань упровадження інноваційної продукції	Неврегульованість питань щодо трансферу технологій. Невеликий потенціал підприємств харчової промисловості щодо реалізації проектів з упровадження нанотехнологій. Невисокий рівень фінансування інноваційних проектів

3. *Експертне оцінювання харчової продукції.* Для кількісного вимірювання сильних і слабких сторін інноваційної продукції з харчовою добавкою «Магнетофуд», можливостей і загроз її виробництва та реалізації використано метод бальної оцінки із застосуванням певної шкали оцінювання (табл. 7.8 та табл. 7.9).

Шкала для оцінювання сильних і слабких сторін харчової продукції

Оцінка, бал	Формулювання
Сильна сторона	
5	Визначна перевага нової продукції порівняно з продуктом-аналогом (характеристика, притаманна тільки новій продукції)
4	Значна перевага нової продукції порівняно з продуктом-аналогом (характеристика, що має кращі значення за всіма видами нової продукції)
3	Певна перевага нової продукції порівняно з продуктом-аналогом (характеристика, що має кращі значення за більшістю видів нової продукції)
2	Середня перевага нової продукції порівняно з продуктом-аналогом (характеристика, що має кращі значення за окремими видами нової продукції)
1	Незначна перевага нової продукції порівняно з продуктом-аналогом (характеристика, що має кращі значення за певним новим продуктом)
Слабка сторона	
-1	Дещо слабша сторона нової продукції порівняно з продуктом-аналогом (характеристика, що зумовлює ускладнення за окремими операціями виробництва й реалізації нової продукції)
-2	Середній рівень слабкості нової продукції порівняно з продуктом-аналогом (характеристика, що зумовлює ускладнення за окремими процесами виробництва й реалізації нової продукції)
-3	Слабка сторона нової продукції порівняно з продуктом-аналогом (характеристика, що зумовлює ускладнення за процесами виробництва й реалізації нової продукції)
-4	Значно слабша сторона нової продукції порівняно з продуктом-аналогом (характеристика, що ставить під сумнів доцільність виробництва й реалізації нової продукції)
-5	Дуже слабка сторона нової продукції порівняно з продуктом-аналогом (характеристика, що свідчить про недоцільність виробництва й реалізації нової продукції)

**Примітка: розроблено на основі [432]*

Таблиця 7.9

**Шкала для оцінювання можливостей і загроз виробництва
та реалізації харчової продукції**

Оцінка, бал	Формулювання
Можливості	
5	Дуже сильні, надають стратегічно значущу підтримку для виробництва й реалізації харчової продукції
4	Значущі, сильно полегшують досягнення цілей із виробництва й реалізації харчової продукції
3	Помірно полегшують досягнення цілей із виробництва й реалізації харчової продукції
2	Певною мірою полегшують досягнення цілей із виробництва й реалізації харчової продукції
1	Майже не полегшують досягнення цілей із виробництва й реалізації харчової продукції
Загрози	
-1	Майже не загрожують досягненню цілей із виробництва й реалізації харчової продукції
-2	Певною мірою загрожують досягненню цілей із виробництва й реалізації харчової продукції
-3	Загрожують досягненню цілей із виробництва й реалізації харчової продукції
-4	Значно загрожують досягненню цілей із виробництва й реалізації харчової продукції
-5	Дуже сильно загрожують досягненню цілей із виробництва й реалізації харчової продукції, роблячи їх досягнення майже неможливим

**Примітка: розроблено на основі [12]*

Оцінювання сильних і слабких сторін інноваційної харчової продукції, загроз і можливостей її виробництва та реалізації рекомендовано здійснювати з урахуванням коефіцієнта значущості певного чинника (K_i), розрахованого за формулою (7.6):

$$K_i = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij}}, \quad (7.6)$$

де K_i – значущість i -го чинника, коефіцієнт;

x_{ij} – кількість балів, призначена j -м експертом i -му чиннику.

Для підтвердження узгодженості думок експертів щодо значущості чинників рекомендовано використати коефіцієнт конкордації Кендала (W) (7.7):

$$W = \frac{12}{m^2 \cdot (n^3 - n)} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m \left(a_{ij} - \frac{n+1}{2} \right) \right)^2, \quad (7.7)$$

де W – коефіцієнт конкордації;

a_{ij} – ранг i -го чинника j -го експерта;

m – кількість експертів;

n – кількість чинників.

Коефіцієнт конкордації (W) може набувати значень від 0 до 1. Про узгодженість думок експертів свідчить наближення цього коефіцієнта до 1.

Узагальнена оцінка сильних і слабких сторін інноваційної харчової продукції, загроз і можливостей її виробництва та реалізації здійснюється з огляду на середню бальну оцінку кожного з досліджуваних чинників та коефіцієнта їх значущості (7.8) та (7.9):

$$P_s = \sum_{i=1}^n K_i \cdot B_i, \quad (7.8)$$

$$B_i = \frac{\sum_{j=1}^m B_{ij}}{m}, \quad (7.9)$$

де P_s – комплексний показник інноваційної продукції за s -м напрямом дослідження (сильні та слабкі сторони, можливості й загрози), бал;

B_i – середня оцінка за i -м чинником;

B_{ij} – оцінка i -го чинника j -м експертом.

4. *Аналіз результатів.* Порівняння узагальнених оцінок щодо сильних і слабких сторін харчової продукції, можливостей і загроз її виробництва дозволяє визначити найбільш значущі чинники для практичної реалізації інноваційних розробок.

5. *Висновок щодо перспектив виробництва та реалізації харчової продукції.* Зіставлення між собою узагальнених оцінок сильних і слабких сторін інноваційної продукції, можливостей і загроз її виробництва та реалізації дозволяє зробити загальний висновок про перспективи впровадження інноваційної продукції у практику господарської діяльності.

Результати дослідження свідчать, що сильні сторони інноваційної продукції з харчовою добавкою «Магнетофуд» переважають над слабкими, а потенційні можливості її виробництва та реалізації на ринку перевищують загрози.

Як відзначено вище харчова продукція, виготовлена з використанням добавки «Магнетофуд», має високий рівень наукоємності, що забезпечує їй унікальність і значні конкурентні переваги порівняно з продуктами-аналогами. Хлібобулочні, м'ясні, борошняні, кондитерські, пастильно-мармеладні, кисломолочні вироби та збиті десерти, вироблені з добавкою «Магнетофуд», набувають покращених функціонально-технологічних характеристик. Підвищення їх сорбційних, емульгувальних, структуроутворювальних, стабілізуювальних, водозв'язувальних, водо- та жирутримувальних властивостей сприяє ресурсозбереженню під час виробництва харчової продукції та підвищенню економічної ефективності її виробництва. Продукція доступна за ціною, а коефіцієнт співвідношення якості й ціни продукції перевищує 1,0, що підтверджує цінність інноваційної продукції для споживача. Сильною стороною інноваційної продукції також є її патентна захищеність.

Слабкими сторонами інноваційної продукції, на думку експертів, є низька поінформованість споживачів про нові продукти та їх переваги, а також ризики виробників у разі впровадження нової продукції. Зазначені чинники певною мірою пов'язані з неврегульованими питаннями щодо впровадження нанотехнологій і наноматеріалів у практику діяльності підприємств харчової індустрії.

Як відзначають дослідники [432], у країнах, де нанотехнології активно використовуються у виробництві споживчих товарів, існують національні стандарти в галузі нанотехнологій. Попри те, що створення індустрії наноматеріалів і нанотехнологій належить до пріоритетних напрямів розвитку інновацій в Україні [431], питання розвитку наноіндустрії та використання результатів досліджень дотепер не мають остаточного вирішення. Щодо можливостей упровадження у практичну діяльність підприємств харчової промисловості продукції з ХДМ слід відзначити таке. Виробництво нанопродуктів є однією з найбільш динамічних сфер діяльності. Світовий ринок нанотехнологій стрімко зростає та, за деякими прогнозами, перевищить 125 млрд. дол. США до 2024 р. [431]. З огляду на тенденції упровадження результатів нанодосліджень [431–433], використання нанотехнологій у харчовій промисловості визнано одним із перспективних напрямів виробництва нанопродукції споживчого призначення. У структурі попиту на нанопродукцію [432] за сегментами споживчого ринку 5,0 % припадає на ринок продуктів харчування (рис. 7.4, а).

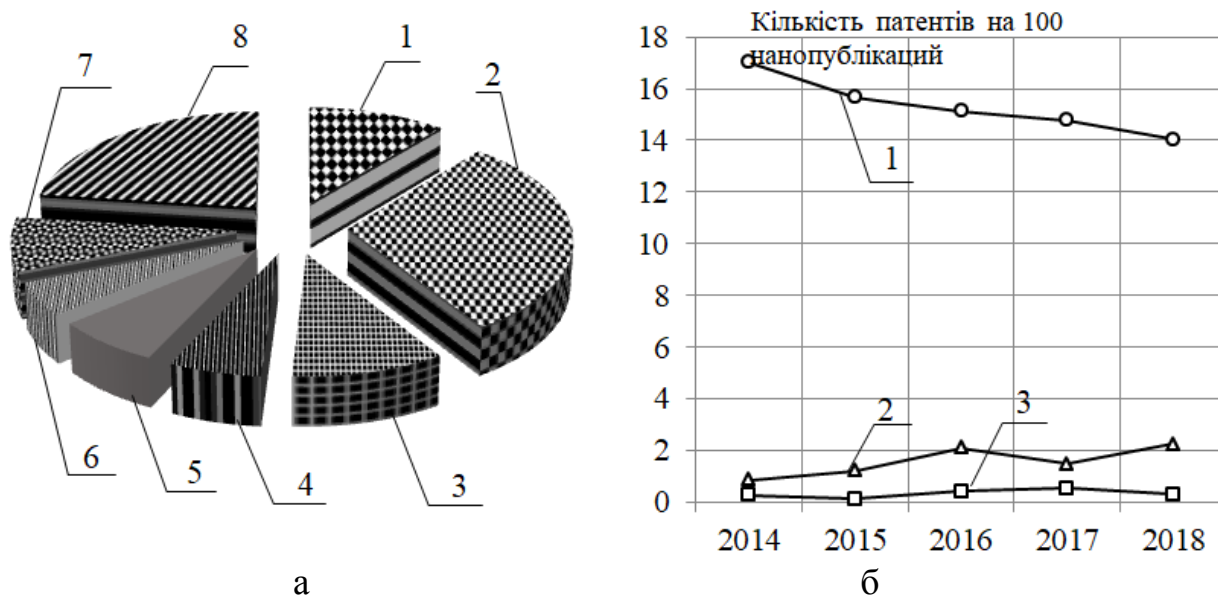


Рис. 7.4. Структура попиту на нанопродукцію (побудовано за даними [431]) (а) (1 – будівництво, 11%; 2 – електроніка, 30%; 3 – виробництво косметичних засобів, 10%; 4 – медицина, 6%; 5 – текстильна промисловість, 7%; 6 – харчування, 5%; автомобільна промисловість, 8%; інші, 23%) та співвідношення кількості патентів за результатами нанодосліджень і статей із проблематики наноіндустрії (побудовано за даними [431, 432]) (б) (1 – у середньому світі; 2 – Турція; 3 – Україна)

До чинників, що сприяють просуванню нанопродукції на ринку, віднесено також підвищення культури взаємодії бізнесу та науки з питань упровадження інноваційної продукції, що підтверджується покращенням позиції України за показниками Глобального інноваційного індексу (табл. 7.10).

Таблиця 7.10

Рейтинг України за індикаторами Глобального інноваційного індексу за 2016–2018 рр.

Показник	2016	2017	2018
	рейтинг зі 128 країн	рейтинг зі 127 країн	рейтинг зі 126 країн
Глобальний інноваційний індекс	56	50	43
Підіндекс «Знання та технології»	33	32	27
Підпункти: Створення знань	16	16	15
Вплив знань	90	77	40
Розповсюдження знань	61	54	53

**Примітка: складено за даними [432]*

Дослідники питань комерціалізації нанотехнологій в Україні зазначають, що підприємства харчової промисловості є найбільш підготованими до сприйняття та втілення нанотехнологій [431].

Водночас активність цих підприємств щодо реалізації проектів з упровадження нанотехнологій невисока.

Відзначимо, що така ситуація в харчовій промисловості є відображенням загальних тенденцій на ринку нанорозробок в Україні. За офіційними даними сайта Stat Nano [432, 433], співвідношення кількості патентів за результатами нанодосліджень і статей із проблематики наноіндустрії є невеликим та впродовж 2016–2018 рр. має тенденцію до зменшення. Дані також свідчать, що цей коефіцієнт в Україні значно менше середньосвітових показників і показника Турції, найближчої до неї в рейтингу (рис. 7.4, б).

Упровадження нанопродукції в діяльність підприємств базується на сприйнятті інновацій як чинника конкурентоспроможності підприємства й активності з їх упровадження в практику господарювання.

Відповідно до даних звіту Lux Research [432], глобальні корпорації, що займаються нанотехнологіями, розробляють стратегії з упровадження нанопродуктів і активно співпрацюють з університетами, стартапами й іншими учасниками наноіндустрії в цьому напрямі.

За даними Європейського звіту з нанотехнологій [431], фінансування нанотехнологій у Європі здебільшого відбувається за рахунок приватних компаній. В українських реаліях венчурне фінансування не набуло поширення. Фінансування інноваційної діяльності здійснюється переважно за рахунок власних коштів господарюючих суб'єктів, що супроводжується високими ризиками для підприємств, які впроваджують інновації.

За даними Державної служби статистики України, частка інвесторів (зарубіжних і вітчизняних) у загальному обсягу фінансування інноваційної діяльності впродовж 2015–2017 рр. становила 1,0–4,2 % за періодами часу [432, 433].

Дослідження ключових характеристик інноваційної продукції з харчовою добавкою «Магнетофуд», а також стану і перспектив упровадження нанотехнологій у виробництво харчової продукції стали підґрунтям для SWOT-аналізу інноваційної продукції з добавкою «Магнетофуд», результати якого наведено в (Додатки Т.6–Т.9).

Результати кількісного SWOT-аналізу, наведені в табл. 7.11, дозволили визначити, що сильні сторони інноваційної харчової продукції з використанням харчової добавки «Магнетофуд» превалюють над її слабкими сторонами.

Встановлено також, що можливості щодо впровадження розробленої продукції в практику господарської діяльності переважають загрози, що супроводжують цей процес.

Таблиця 7.11

**Результати SWOT-аналізу інноваційної продукції
з харчовою добавкою «Магнетофуд»**

Сильні сторони	Значущість	Оцінка, бал	Значення, бал	Слабкі сторони	Значущість	Оцінка, бал	Значення, бал
Унікальність пропозиції	0,24	4,5	1,1	Низький рівень інформативності споживачів про нові продукти та їх переваги	0,10	–	–
Додатковий прибуток для виробника	0,19	4,2	0,8				
Патентна захищеність	0,18	4,8	0,9	Ризики впровадження нової продукції для виробників	0,16	–	–
Доступна ціна	0,13	4,4	0,6				
Разом	–	–	3,4	Разом	–	–	–
Потенційні можливості				Загрози			
Значний попит на впровадження результатів нанодосліджень у сферу харчування	0,26	3,6	0,9	Неврегульованість питань щодо трансферу технологій	0,13	4,8	0,6
Зростання ринку нанотехнологій та нанопродукції	0,21	4,7	1,0	Невеликий потенціал підприємств харчової промисловості щодо реалізації проектів з упровадження нанотехнологій	0,13	4,3	0,5
Підвищення культури взаємодії бізнесу та науки з питань упровадження інноваційної продукції	0,08	3,9	0,3	Невисокий рівень фінансування інноваційних проектів	0,19	4,9	0,9
Разом	–	–	2,3	Разом	–	–	2,1

Ці дані загалом свідчать про великі перспективи впровадження продукції з використанням наночастинок харчової добавки «Магнетофуд» у діяльність підприємств харчової промисловості.

Висновки за розділом 7

1. Обґрунтовано науково-методичний підхід до оцінювання ефективності інноваційних технологій харчової продукції, який базується на засадах коефіцієнтного аналізу та включає сукупність показників, що характеризують наукову й науково-технічну результативність, соціальну й економічну ефективність інноваційних розробок. Для оцінювання наукової результативності обґрунтовано використання показників, що відображають науковий рівень, новизну та глибину наукових розробок, наукоємність продукції; для науково-технічної результативності – перспективність і масштаб упровадження, період і ступінь реалізації інноваційної розробки; для соціальної ефективності – цінність інноваційної продукції для споживача за співвідношенням «якість-ціна»; для економічної ефективності – рентабельність продукції. Застосування обґрунтованої системи показників підтвердило високий рівень ефективності інноваційних технологій харчової продукції з використанням ХДМ.

2. Узагальнені дані щодо наукового рівня, новизни та глибини розробок дозволило зробити висновок про високий рівень інноваційних технологій. Установлено, що запровадження розроблених технологій забезпечує високий рівень наукоємності продукції, абсолютні значення якої (0,78...1,09%) в 1,05...1,50 рази перевищують відповідні показники за видами економічної діяльності в Україні (0,75%).

3. Оцінено науково-технічна результативність наукових розробок, що засвідчило їх високий рівень, який підтверджується можливістю використання їх в багатьох напрямках, зокрема для розробки нових рішень у сфері виробництва косметологічної й фармацевтичної продукції, продуктів харчування профілактичної дії.

4. За результатами порівняльного аналізу якісних і цінових характеристик інноваційної продукції зроблено висновок про більшу цінність

нових продуктів для споживачів сегмента B2C порівняно з продуктами-аналогами.

5. Доведено економічну доцільність упровадження розробок у практичну діяльність підприємств харчової промисловості. Визначено, що за рахунок більш високих якісних характеристик додатковий прибуток, який отримає підприємство-виробник за умови впровадження інноваційної продукції у виробництво, становитиме 0,1...4,4 тис. грн на кожні 1000 кг інноваційної продукції.

6. Обґрунтовано науково-методичний інструментарій використання SWOT-аналізу під час розробки та просування харчової продукції. Наведено послідовність оцінювання перспектив упровадження в діяльність підприємств харчової промисловості інноваційної продукції з використанням SWOT-аналізу, що передбачає зіставлення комплексних показників сильних і слабких сторін, можливостей і загроз виробництва й реалізації продукції. Показники розраховано з огляду на значущість і силу впливу чинників, які відображають ключові сильні та слабкі сторони, можливості й загрози виробництва та реалізації харчової продукції ХДМ.

7. Визначено сильні та слабкі сторони виробництва продукції з використанням ХДМ, а також стратегічні перспективи та загрози для просування цієї продукції на ринку. Установлено, що найбільш сильними сторонами продукції з використанням ХДМ є унікальність пропозиції та патентна захищеність, слабкими – низький рівень інформативності споживачів про нові продукти та ризики виробників у разі впровадження нової продукції. Щодо стратегічних перспектив просування нової продукції на ринку, то вони зумовлені переважно зростанням ринку нанотехнологій та нанопродукції, а також попитом на впровадження результатів нанодосліджень у сферу харчування. Основними загрозами для реалізації продукції з використанням ХДМ є невисокий рівень фінансування інноваційних проектів і нерегульованість питань щодо трансферу технологій.

ВИСНОВКИ

1. Унаслідок аналізу та узагальнення даних літературних джерел видокремлено науково-технічну проблему ресурсозбереження та створення ефективних технологій виробництва якісної харчової продукції з регульованими функціонально-технологічними властивостями і показниками безпеки. На теоретичному підґрунті з фундаментальних наук визначено інноваційний потенціал залучення нанотехнологій та наночастинок для їх включення в технологічний потік харчової продукції. Сформульовано та реалізовано наукову концепцію цілеспрямованого регулювання функціонально-технологічних властивостей харчових систем шляхом використання наночастинок мінерального походження для розширення асортименту якісної харчової продукції з подовженим терміном збереження свіжості. Визначено методи теоретичного та методу експериментального дослідження технології утворення наночастинок мінерального походження та формування їх функціонально-технологічних властивостей для харчових технологій.

2. Визначено, що технологія хімічної конденсації є ефективною та дозволяє регулювати фізико-хімічні показники наночастинок на основі оксидів заліза. Встановлено раціональні параметри технологічного процесу утворення наночастинок із цільовою задачею щодо розміру 70...80 нм. Такими умовами та параметрами є: використання 10% розчинів солей дво- та тривалентного феруму в лужному середовищі ($\text{pH}=10\text{...}11$) за температури $t=(50\pm 5)^\circ\text{C}$ і 1,7...1,8 кратному надлишку солі Fe (II) та 10,0...10,5 кратному надлишку лугу $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$; співвідношення $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}=2:1,75$. Відпрацьована технологія дозволяє отримати наночастинки з розподілом за діаметром, близьким до монодисперсності.

3. Визначено фізико-хімічні показники ХДМ, які доводять, що при ζ -потенціалі 34...44 мВ, діаметрі 70...80 нм, молярній масі 230,8 г/моль, вмісті заліза в масових відсотках не менше 90% та вологи 10% забезпечуються функціонально-технологічні властивості харчової продукції, що є стійкою до

зовнішніх чинників зберігання та окиснення.

4. Експериментальним шляхом доведено підвищення стійкості таких колоїдних систем, як емульсії, в середньому в 1,2...1,3 рази, що зумовлено виявленою взаємодією наночастинок ХДМ з вуглеводами, білками, оліями, жирами і вищими жирними кислотами та їх солями, що приводить до просторового структурування. Виявлено, що загальною функціонально-технологічною властивістю наночастинок ХДМ є антиоксидантна, крім того, вони впливають на загущуючі та тиксотропні властивості харчових систем у цілому.

5. Визначені величини фізико-хімічних показників наночастинок ХДМ, такі як мінімальна щільність поверхневого заряду ($pH=6,8...7,0$), енергія вандер-ваальсової взаємодії ($5...30$ кДж/моль), енергія водневого зв'язку ($20...70$ кДж/моль), що забезпечують таку функціонально-технологічну властивість, як стабілізація дисперсій, які містять полярні та неполярні рідини, тобто стійкі емульсії, суспензії, пасти, креми тощо. Виявлено, що утворення стійких дисперсних систем, до складу яких входять органічні сполуки та вода, за іонними та диполь-іонними взаємодіями відбувається завдяки досить високій енергії координаційного зв'язку $50...200$ кДж/моль.

6. Встановлено, що введення ХДМ у вигляді ЖС є раціональним способом технологій, у яких під час технологічного процесу утворюються такі поліфазні дисперсні системи: емульсії, суспензії, піни. До таких технологій віднесено борошняну продукцію (хліб, пряники, печиво), м'ясні посічені вироби (котлети, біфштекси з яловичини) та десерти з сиру кисломолочного. Визначено раціональні параметри отримання ЖС, до складу якої входить соняшникова олія та ХДМ у співвідношенні олія:ХДМ=50 мас.:%:50 мас.:%: ретельне перемішування суміші ($n=2,0...2,2$ с⁻¹) за температури $t=45...50^{\circ}C$ протягом $\tau=(3...4)\times 60$ с. Відзначено, що залучення наночастинок ХДМ в технологічний процес хлібобулочних, борошняних кондитерських, м'ясних посічених виробів та десертів із сиру кисломолочного приведе до скорочення технологічного циклу випікання

хліба на $(20...25) \times 60$ с та сприятиме стабілізації споживних властивостей готових виробів протягом зберігання. При цьому раціональна масова частка ХДМ дорівнює 0,15% від маси борошна для житньо-пшеничного хліба (або від маси рецептурної суміші для заварних пряників, вівсяного печива, сиркового десерту) та 0,10% від маси рецептурної суміші для м'ясних посічених виробів.

7. Доведено функціональність ХДМ в технології м'ясних посічених виробів: підвищуються водозв'язуюча та водоутримуюча здатність в 1,28...1,32 рази, що приводить до формування соковитої та ніжної консистенції, зниження втрат під час теплової обробки на 5,0...6,0% і підвищення виходу готової продукції на 5,0...6,0%; підвищення жирозв'язуючої та жирутримуючої здатності в 1,26...1,29 разів, жироемульгуючої здатності в 1,24...1,26 разів та стійкості емульсій в 1,22...1,24 рази покращує в'язкопластичні властивості фаршів (зростає граничне напруження зсуву в 1,30...1,35 разів; збільшуються: пластична в'язкість в 1,36...1,40 разів, коефіцієнт консистенції в 1,12...1,15 разів, ефективна в'язкість в 1,6...1,7 разів, вискоеластичний модуль в 1,15...1,17 разів, модуль міттевої пружності в 1,18...1,22 рази), що обумовлює м'яку консистенцію та покращує формоутримуючу здатність фаршевих систем. Визначено, що введення ХДМ функціонально впливає на структурно-механічні характеристики десерту з сиру кисломолочного: зі зростанням масової частки ХДМ збільшується максимальне напруження зсуву в 1,18...1,3 рази порівняно з контролем, зростає коефіцієнт тиксотропії в 1,26 разів. Встановлено, що такий характер впливу позитивно позначається на текстурі продукту.

8. Доведено, що для функціонування ХДМ у технологіях виробів пінної та гелеподібної структури, зокрема формового желейного мармеладу, зефіру біло-рожевого, збитих ягідно-фруктових десертів (мусів, самбуків), ефективним технологічним способом є утворення водних суспензій (ВС) наночастинок ХДМ з відповідними структуроутворювачами, такими як

желатин, агар, пектин. Визначено раціональні параметри утворення ВС: ГМ=1:18:1; $t_1=15...18^\circ\text{C}$; $n_1=2,0...2,2 \text{ c}^{-1}$; $\tau_1=(30...40)\times 60 \text{ с}$ для желатина, $\tau_1=(25...30)\times 60 \text{ с}$ для агара, $\tau_1=(35...40)\times 60 \text{ с}$ для пектина; $t_2=60...65^\circ\text{C}$ для желатина, $t_2=95...100^\circ\text{C}$ для агара, $t_2=85...90^\circ\text{C}$ для пектина; $n_2=2,0...2,2 \text{ c}^{-1}$; $\tau_2=(2...3)\times 60 \text{ с}$. Розроблено технології та вивчено органолептичні показники харчової продукції з використанням ХДМ: ягідно-плодових десертів – мусу «Малинка» і самбуку «Ягідка»; формового желейного мармеладу на агарі «Ранок» і на пектині «Веселка»; зефіру біло-рожевого на агарі «Весна» і на пектині «Літо». Визначено дисперсні характеристики пінних структур у десертах з сиру кисломолочного, з ягідно-плодової сировини (муси, самбуки) та в зефірних масах за умови введення ХДМ: функція розподілу повітряних пухирців за діаметром вузька та симетрична, діаметр $d=(45...50)\cdot 10^{-3} \text{ м}$ є переважаючим чинником, тобто наночастинки ХДМ забезпечують стабільність піни.

9. Доведено, що використання водних суспензій ХДМ (на етапі набрякання-розчинення гелеутворювача) у технологіях виробів гелеподібної структури (формового желейного мармеладу на агарі й пектині) функціонально впливає на структурно-механічні характеристики мармеладу: збільшує в'язкість в 1,3...1,4 рази, швидкість структурування желейних мас в 1,3...1,4 рази; підвищує коефіцієнт тиксотропії в 1,4...1,5 разів; зміцнює просторовий каркас гелю в 1,3...1,5 разів, що позитивно позначається на текстурі продукту та подовженні терміну збереження його свіжості. Крім того, під час зберігання (75 діб) уповільнюється втрата вологи на 11...18% (порівняно з контролем) у таких умовах: відносна вологість повітря $\varphi=(75\pm 2)\%$, температура $t=(18\pm 2)^\circ\text{C}$. Доведено, що в технології мармеладу желейного формового можна зменшити кількість агара на 9...11% і пектину на 7...9%.

10. Встановлено, що під час виробництва продукції пінної структури, зокрема зефіру біло-рожевого, наночастинки ХДМ, що містяться у ВС, виконують роль стабілізаторів піни та збільшують піноутворюючу здатність

в 1,2...1,4 рази, забезпечують піностійкість на рівні $(99\pm 1)\%$. Доведено, що використання ХДМ у вигляді ВС приводить до утворення стійкої пінної структури ягідно-плодових десертів (збільшується піноутворююча здатність мусів в 1,22...1,3 рази і самбуків в 1,23...1,38 разів; стійкість піни складає $(99\pm 1)\%$) і збільшення механічної міцності структури десертних пінних систем в 1,21...1,25 разів.

11. Доклінічними дослідженнями доведено, що ХДМ не бере участі в метаболізмі й не має токсичної дії на організм; належить до IV класу токсичності (малотоксичні речовини, $LD_{50} > 5000$ мг/кг); встановлений цитопротекторний ефект добавки в малих концентраціях введення (0,02 мг/мл і 0,002 мг/мл) є додатковим підтвердженням антиоксидантої активності ХДМ.

12. У ході SWOT-аналізу встановлено, що найбільш сильними сторонами харчової продукції з використанням ХДМ є унікальність пропозиції та патентна захищеність, слабкими – низький рівень інформованості споживачів про нові продукти та ризики виробників у разі впровадження нової продукції. Доведено, що запровадження розроблених технологій забезпечує високий рівень наукоємності продукції, абсолютні значення якої 0,78...1,09% в 1,05...1,50 рази перевищують відповідні показники за видами економічної діяльності в Україні (0,75%). Доведена більша цінність нових продуктів для споживачів сегмента B2C порівняно з продуктами-аналогами. Визначено, що додатковий прибуток за умови впровадження інноваційної продукції у виробництво становитиме до 4,4 тис. грн на кожні 1000 кг інноваційної продукції.

13. Розроблено і затверджено нормативну документацію на ХДМ та нові продукти з її використанням. Проведено роботу з їх упровадження у виробничу діяльність підприємств харчової промисловості, ресторанного господарства України та в освітній процес.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кузнєцов Г. Нанотехнології в харчовій промисловості // Мистецтво лікування. 2013. № 8 (104). С. 48–50.
2. Полумбрик М. О. Нанотехнології в харчових продуктах // Харчова промисловість. 2011. № 10. С. 319–324.
3. Павлюк Р. Ю., Погарська В. В., Біленко Л. М., Юр'єва О. О., Гасанова А. Е., Максимова Н. П. Розробка нових видів булочок для сендвічів для оздоровчого харчування, вітамінізованих каротиноїдними рослинними нанодобавками // ScienceRise. 2017. № 5 (34). С. 52–57.
4. Кудряшева А. Новые полифункциональные нанобиокорректоры // Пищевая промышленность. 2009. № 4. С. 52–54.
5. Hansen S. F., Heggelund L. R., Besora P. R., Mackevica A., Boldrin A., Baun A. Nanoproducts – what is actually available to European consumers? // Environmental Science: Nano. 2016. Iss. 1. P. 1 – 8.
6. Верников В. М., Арианова Е. А., Гмошинский И. В. и др. Нанотехнологии в пищевых производствах: перспективы и проблемы // Вопросы питания. 2009. Т. 78. № 2. С. 4–17.
7. Пасічний В. М., Гередчук А. М. Використання високодисперсного кремнезему в технології м'ясомістких продуктів оздоровчого спрямування // Вестник ХНТУ. 2015. № 4 (55). С. 124–129.
8. Thiruvengadam M., Rajakumar G., Chung M. Nanotechnology: current uses and future applications in the food industry // 3 Biotech. 2018. № 8 (1). P. 74–83.
9. Navya P. N., Daima H. K. Rational engineering of physicochemical properties of nanomaterials for biomedical applications with nanotoxicological perspectives // Nano Converg. 2016. № 3. P. 1– 13.
10. Онищенко Г. Г. Обеспечение санитарно-эпидемиологического благополучия населения в условиях расширенного использования наноматериалов и нанотехнологий // Гигиена и санитария. 2010. № 2. С. 4–7.

11. Shang Y., Hasan Md. K., Ahammed G. J., Li M., Yin H., Zhou J. Applications of nanotechnology in plant growth and crop protection: a review // *Molecules*. 2019. № 24 (14). P. 2558 – 2567.
12. Проданчук М. Г., Слободкін В. І., Левицька В. М. Перспективи впровадження нанотехнологій і наноматеріалів у харчовій промисловості, їх гігієнічна оцінка та актуальні завдання наногігієни харчування // *Проблеми харчування*. 2010. № 3/4. С. 5–15.
13. Bajpai V. K., Kamle M., Shukla S., Mahato D. K., Chandra P., Hwang S. K., Kumar P., Huh Y. S., Han Y.-K. Prospects of using nanotechnology for food preservation, safety, and security: Review // *Journal of Food and Drug Analysis*. 2018. Vol. 26. Iss. 4. P. 1201–1214.
14. Kagan V. E., Bayir H., Svedova A. A. Nanomedicine and nanotoxicology: two sides of the same coin // *Nanomedicine: nanotoxicology, biology and medicine*. 2005. № 1. P. 313–316.
15. Sanvicens N. M., Pilar M. Multifunctional nanoparticles – properties and prospects for their use in human medicine: review // *Trends in Biotechnology*. 2008. Vol. 26. Iss. 8. P. 425–433.
16. Moriarty P. Nanostructured materials // *Reports on Progress in Physics* 2001. Vol. 64. № 3. P. 297–313.
17. EU Strategy 2020. Communication from the Commission: EUROPE 2020 – A strategy for smart, sustainable and inclusive growth. European Commission, 2010.
18. Sharma S., Jaiswal S., Duffy B., Jaiswal A. K. Nanostructured Materials for Food Applications: Spectroscopy, Microscopy and Physical Properties: review // *Bioengineering MDPI*. 2019. 6. 26. P. 1–17.
19. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // *Acta Mater*. 2000. Vol. 48. P. 1–29.
20. Roco M. C. National nanotechnology initiative: past, present and future: Handbook on nanoscience, engineering and technology. CRC, Taylor and Francis, Boca Raton and London, 2007. P. 3.1–3.26.

21. Hoet P. M., Bruske-Hohlfeld I., Salata O. V. Nanoparticles – known and unknown health risks // *J. of Nanobiotechnology*. 2004. Vol. 2. P. 12–18.
22. Roco M. C., Mirkin C. A., Hersam M. C. Nanotechnology research directions for societal needs in 2020: summary of international study // *Journal of Nanoparticle Research*. 2011. Vol. 13. Iss. 3. P. 897–919.
23. Nanotechnologies: A Preliminary Risk Analysis on the Basis of a Workshop Organized in Brussels on 1–2 March 2004 by the Health and Consumer Protection Directorate General of the European Commission.
24. Jeevanandam Jaison, Barhoum Ahmed, Chan Yen S., Dufresne Alain, Danquah Michael K. Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations // *Beilstein J. Nanotechnol.* 2018. Vol.9. P. 1050–1074.
25. Ebbesen M., Jensen T. G. Nanomedicine: techniques, potentials, and ethical implications // *Journal of Biomedicine and Biotechnology*. 2006. № 1. P. 1–11.
26. Gusev A. I., Rempel A. A. Nanocrystalline materials. Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 2004. 351 p.
27. Lima E. G. Organization and Classification of Nanotechnology: a pathway to the standardization of nanotechnology // *Nanoscience and Nanoengineering*. 2017. № 5 (3). P. 31–44.
28. Subramani K., Elhissi A., Subbiah U., Ahmed W. Introduction to nanotechnology // *Nanobiomaterials in Clinical Dentistry (Second Edition)*. Micro and nano technologies. 2019. P. 3–18
29. Nasrollahzadeh M., Sajadi S. M., Sajjadi M., Issaabadi Z. An introduction to nanotechnology // *Interface Science and Technology*. 2019. Vol. 28. P. 1–27
30. Алешков А. В. Нанотехнологии в пищевой промышленности: возможности и риски // *Проблемы экологии. Вестник ХГАЭП*. 2011. № 3 (54). С. 135–159.

31. Kudr J., Haddad Y., Richtera L., Heger Z., Cernak M., Adam V., Zitka O. Magnetic nanoparticles: from design and synthesis to real world applications // *Nanomaterials* (Basel). 2017. № 7(9). P. 243–235.

32. Цихановська І. В., Євлаш В. В. Використання наночастинок природних мінералів у харчових технологіях // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: тези Міжнар. наук.-практ. конф., 15 травня 2019 р. у 2 ч. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2019. С. 5–6.

33. Akbarzadeh A., Samiei M., Davaran S. Magnetic nanoparticles: preparation, physical properties, and applications in biomedicine // *Nanoscale Res Lett*. 2012. № 7 (1). P. 144–153.

34. Sozer N., Kokini J. L. Nanotechnology and its applications in the food sector // *Trends Biotechnol*. 2009. Vol. 27. P. 82–89.

35. Chaudhry O., Castle P., Watkins R. Nanotechnology in food. RSC Publishing, 2010. 300 p.

36. Schulz J., et al. Distribution of sunscreens on skin // *Adv. Drug. Deliv. Rev*. 2002. Vol. 54 (Suppl. 1). P. 157–163.

37. Heilprin J. EPA to Regulate a Form of Nanotechnology for the First Time // *Associated Press*. 2006. № 23. P. 5–7.

38. Aitken R. J., et al. Nanoparticles: An Occupational Hygiene Review // *Health Safety Executive. Research Report 274*. London: HSE Books, 2004. 87 p.

39. Окара А. И. Нанотехнологии в производстве пищевых продуктов: состояние нормативной базы и проблемы // *Вестник ХГАЭП*. 2011. № 1 (52). С. 79–85.

40. Mozafari M. R., Johnson C., Hatziantoniou S., et al. Nanoliposomes and their applications in food nanotechnology // *J. Liposom. Res*. 2008. № 18 (4). P. 309–327.

41. Moraru C. I., Panchapakesan C. P., Huang Q., Takhistov P., et al. Nanotechnology: A new frontier in food science. *Food Technol*. 2003. Vol. 7. № 12. P. 24–29.

42. V. Galstyan, M. P. Bhandari, V. Sberveglieri, G. Sberveglieri Metal Oxide Nanostructures in Food Applications: Quality Control and Packaging: Review// Chemosensors MDPI. 2018.Vol. 6. № 16. P. 1–21.
43. Singh T., Shukla S., Kumar P., Wahla V., Bajpai V. K., Rather I. A. Application of Nanotechnology in Food Science: Perception and Overview // Front Microbiol. 2017 № 8. P. 1501–1512.
44. Білецький В. С., Смирнов В. О. Переробка і якість корисних копалин. Донецьк: Східний видавничий дім, 2005. 324 с.
45. Ali A., Zafar H., Zia M., Haq I., Phull A. R., Ali J. S., Hussain A. Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles // Nanotechnol Sci Appl. 2016. № 9. P. 49–67.
46. Deraz N. M., Alarifi A. Synthesis and physicochemical properties of nanomagnetic zinc ferrite system // Int. J. Electrochem. Sci. 2012. № 7. P. 3798–3808
47. Nouailhat A. An Introduction to Nanoscience and Nanotechnology. London: ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2008. 229 p.
48. Whitesides G. M. Nanoscience, nanotechnology and chemistry // Small. 2005. Vol. 1. №2. P. 172–179.
49. Keskinbora K. H., Jameel M. A. Nanotechnology applications and approaches in medicine: a review // Journal of Nanoscience & Nanotechnology Research. 2018. Vol.2. № 2. p. 1–6.
50. Klaus T., Joerger R., Olsson E., Granqvist C. G. Silver-based crystalline nanoparticles, microbially fabricated proc. // Natl. Acad. Sci. USA. 1999. Vol.96. № 24. P.13611–13614.
51. Klaus-Joerger T., Joerger R., Olsson E., Granqvist C. G. Bacteria as workers in the living factory // Trends Biotechnol. 2001. № 19. P. 15.
52. Das D., Ahmed G. Silver nanoparticles damage yeast cell wall // International Research Journal of Biotechnology. 2012. Vol. 3(3).P. 37–39

53. Khan I., Saeed K., Khan I. Review: Nanoparticles: properties, applications and toxicities // *Arabian Journal of Chemistry*. 2019. Vol. 12. Iss. 7, P. 908–931.

54. Jeevanandam J., Barhoum A., Chan Y. S, Dufresne A., Danquah M. K. Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations // *Beilstein J. Nanotechnol.* 2018. Vol. 9. P. 1050–1074.

55. Snir Reut. Trends in global nanotechnology regulation: the public-private interplay // *Vand. J. Ent. & Tech. L.* 2014. Vol. 17. №1. P. 107–169.

56. Yahya N., Mohamad A., Daud H., et al. Synthesis and characterization of magnesium zinc ferrites as electromagnetic source // *Am. J. Engg. and Appl. Sci.* 2008. Vol. 1. № 1. P. 54–57.

57. Puspitasari P., Yahya N., Zabidi N., Ahmad N. Comparison of mechanical properties and magnetic properties of $Mn_{0,8}Zn_{0,2}Fe_2O_4$ synthesized by conventional ball milling and self combustion method // *J. Appl. Sci.* 2011. Vol. 11. № 7. P. 1199–1205.

58. Isfahani N., Myndyk M., Menzel D., et al. Magnetic properties of nanostructured MnZn ferrite // *J. Magn. Magn. Mater.* 2009. Vol. 1. № 231. P. 152–158.

59. Šepelák V., Tkacova K. Mechanically induced structural disordering in spinel ferrites // *Acta Montanistica Slovaca*. 1997. Vol. 2, № 3. P. 266–272.

60. Šepelák V., Druska P., Steinike U. Surface structural disorder in mechanosynthesized and mechanically activated zinc ferrite // *Mater. Structure*. 1999. Vol. 6. № 2. P. 100–101.

61. Lorenzou S., Karadimitra K., Agrafiotis C., Konstadopoulos A. New routes for ferrite powder synthesis // *Partec*. 2004. Vol. 1. № 32. P. 164–171.

62. Ghobeiti H., Seyyed E., Badiei A., et al. An investigation on physical properties of strontium hexaferrite nanopowder synthesized by a sol-gel auto-combustion process with addition of cationic surfactant // *J. Eur. Ceram. Soc.* 2007. Vol. 1. № 27. P. 3637–3640.

63. Randhawa B. S., Sweetey K. Physic–chemical studies of zinc hexa (formato) ferrate (III) decahydrate // *J. Them. Anal. and Calorimetry*. 2000. Vol. 60. № 1. P. 535–539.

64. Chimamkpam E., Schweizer T., Schilling A., Ferreira J. Rapid one-step chemical synthesis of polyaniline-manganese ferrite nanocomposites without external initiator and mechanical agitation // *Nanotechnology*. 2011. Vol. 1. № 5. P. 527–530.

65. Singhal S., Namgyal T., Bansal S., Chandra K. Effect of Zn substitution of the magnetic properties of cobalt ferrite nanoparticles prepared via sol-gel route // *J. Electromagnetic Analysis & Appl.* 2010. № 2. P. 376–381.

66. Xu Y., Liang Y., Jiang L., et al. Preparation and magnetic properties of ZnFe₂O₄ nanotubes // *J. Nanomaterials*. 2011. Vol. 2011. № 1. P. 1–5.

67. Xu J., Yang H., Fu W., Du K., Sui Y., Chen J., Zeng Y., Li M., Zou G. Preparation and magnetic properties of magnetite nanoparticles by sol-gel method // *J. Magn. Magn. Mater.* 2007. Vol. 309. P. 307–311.

68. Yuan H., Wang Y., Zhou S., et al. Low-temperature preparation of superparamagnetic CoFe₂O₄ microspheres with high saturation magnetization // *Nanoscale Res. Lett.* 2010. Vol. 1. № 5. P. 1817–1821.

69. Westrum E., Gronvold F. Magnetite (Fe₃O₄) heat capacity and thermodynamic properties from 5 to 350 K, low-temperature transition // *J. Chem. Thermodynamics*. 1969. Vol. 1. № 1. P. 543–557.

70. Byrappa K., Yoshimura M. Handbook of hydrothermal technology. New York: Hard Cover, 2001. 875 p.

71. Baraton M. I. Synthesis, functionalization and surface treatment of nanoparticles. Los-Angeles: Am. Sci., 2002. 237 p.

72. Meskin P. E., Churagulov B. R., Tretyakov Y. D., et al. Ultrasonically-assisted hydrothermal synthesis of nanocrystalline ZrO₂, TiO₂, NiFe₂O₄ and Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ powders // *J. Ultrason. Sonochem.* 2006. Vol. 1. № 13. P. 47–53.

73. Hayashi H., Hakuta Y. Hydrothermal Synthesis of Metal Oxide Nanoparticles in Supercritical Water // *Materials (Basel)*. 2010. №3 (7). P. 3794–3817.

74. Simeonidis K., Mourdikoudis S., Moulla M. et al. Controlled synthesis and phase characterization of Fe-based nanoparticles obtained by thermal decomposition // *J. Magn. Magn. Mater.* 2007. Vol. 1. № 316. P. 1–4.

75. Lu A. H., Salabas E. L., Schüth F. Magnetic nanoparticles: Synthesis, protection, functionalization, and applicatio // *Angew. Chemie. Int. Ed.* 2007. Vol. 46. № 8. P. 1222–1244.

76. Sun S., Zeng H. Size-controlled synthesis of magnetite nanoparticles // *J. Am. Chem. Soc.* 2002. Vol. 124. № 28. P. 8204–8205.

77. Lee N., Hyeon T. Designed synthesis of uniformly sized iron oxide nanoparticles for efficient magnetic resonance imaging contrast agents // *Chem. Soc. Rev.* 2012. Vol. 41. № 7. P. 2575–2589.

78. Yoo D., Lee J. H., Shin T. H., Cheon J. Theranostic magnetic nanoparticles // *Acc. Chem. Res.* 2011. T. 44, № 10. P. 863–874.

79. Yamaura M., Camilo R. L., Sampaio L. C., Mackdo M. A., Nakamura M., Toma H. E. Preparation and characterization of (3-aminopropyl) triethoxysilane-coated magnetite nanoparticles // *J. Magn. Magn. Mater.* 2004. Vol. 279. № 2/3. P. 210–217.

80. Yu W. W., Falkner J. C., Yavuz C. T., Colvin V. L. Synthesis of monodisperse iron oxide nanocrystals by thermal decomposition of iron carboxylate salts // *Chem. Commun. (Camb).* 2004. Vol. 20. P. 2306–2307.

81. Li Z., Sun Q., Gao M. Preparation of water-soluble magnetite nanocrystals from hydrated ferric salts in 2-pyrrolidone: Mechanism leading to Fe_3O_4 // *Angew. Chemie. Int. Ed.* 2004. Vol. 44. P. 123–126.

82. Yang H., Zhang C., Shi X., Hu H., Du X., Fang Y., Ma Y., Wu H., Yang S. Water-soluble superparamagnetic manganese ferrite nanoparticles for magnetic resonance imaging // *Biomaterials.* 2010. Vol. 31. № 13. P. 3667–3673.

83. Pinna N., rancharov S., Beato P., Bonville P., Antonietti M., Niederberger M. Magnetite nanocrystals: nonaqueous synthesis, characterization, and solubility // *Chem. Mater.* 2005. Vol. 17. № 11. P. 3044–3049.

84. Chen D., Xu R., Xu R. Hydrothermal synthesis and characterization of nanocrystalline-Fe₂O₃ particles // *J. Solid State Chem.* 1998. Vol. 190. № 137. P. 185–190.

85. Abu Mukh-Qasem R., Gedanken A. Sonochemical synthesis of stable hydrosol of Fe₃O₄ nanoparticles // *J. Colloid Interface Sci.* 2005. Vol. 284. P. 489–494.

86. Willard M. A., Kurihara L. K., Carpenter E. E., et al. Chemically prepared magnetic nanoparticles // *Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology*. Valencia: American Scientific Publishers, 2004. Vol. 1. № 1. P. 815–848.

87. Laurent S., Forge D., Port M., et al. Magnetic iron oxide nanoparticles: synthesis, stabilization, vectorization, physicochemical characterizations, and biological applications // *Chem. Rev.* 2008. Vol. 108. № 6. P. 2064–2110.

88. Mir S. H., Nagahara L. A., Thundat T., Mokarian-Tabari P., Furukawa H., Khosla A. Review: organic-inorganic hybrid functional materials: an integrated platform for applied technologies // *J. Electrochem. Soc.* 2018. Vol. 165. Iss. 8. P. 3137–3156

89. Bruchhaus L., Mazarov P., Bischoff L., Gierak J., Wieck A. D., Hövel H. Comparison of technologies for nano device prototyping with a special focus on ion beams: A review // *Applied Physics Reviews*. 2017. Vol. 4. Iss. 1. P. 10–32. <https://doi.org/10.1063/1.4972262>.

90. Flory F., Escoubas L., Berginc G. Optical properties of nanostructured materials: a review / *J. of Nanophotonics*. 2011. № 5(1) P. 5–25. <https://doi.org/10.1117/1.3609266>.

91. Napolsky K. S., Eliseev A. A., Knotko A. V., et al. Preparation of ordered magnetic iron nanowires in the mesoporous silica matrix // *J. Mater. Sci. and Engineering*. 2003. Vol. 1. № 23. P. 151–154.

92. Pileni M. P. Reverse micelles as microreactors // *J. Phys. Chem.* 1993. Vol. 97. № 1. P. 6961–6973.

93. Yang H. H., Zhang S. Q., Chen X. L., et al. Magnetite-containing spherical silica nanoparticles for biocatalysis and bioseparations // *Anal. Chem.* 2004. Vol. 76. № 5. P. 1316–1321.

94. Yener D., Giesche H. Synthesis of pure and manganese-, nickel-, and zinc-doped ferrite particles in water-in oil microemulsion // *J. Am. Ceram. Soc.* 2001. Vol. 84. № 9. P. 1987–1995.

95. Zheng M., Wu X. C., Zou B. S., Wang Y. J. Magnetic properties of nanosized MnFe_2O_4 particles // *J. Magn. Magn. Mater.* 1998. Vol. 1. № 183. P. 152–156.

96. Shannon A. M., Cahill C. L., Carpenter E. E., et al. Magnetic and structural properties of nickel zinc ferrite nanoparticles synthesized at room temperature // *J. Appl. Phys.* 2004. Vol. 95. № 11. P. 6392–6395.

97. Pileni M.-P. The role of soft colloidal templates in controlling the size and shape of inorganic nanocrystals // *Nat. Mater.* 2003. Vol. 2. № 3. P. 145–150.

98. Housaindokht M. R., Nakhaei Pour A. Study the effect of HLB of surfactant on particle size distribution of hematite nanoparticles prepared via the reverse microemulsion // *Solid State Sci.* 2012. Vol. 14. № 5. P. 622–625.

99. Pileni M. Water in oil colloidal droplets used as microreactors // *Adv. Colloid Interface Sci.* 1993. Vol. 46. P. 139–163.

100. Okoli C., Sanchez-Dominguez M., Boutonnet M., Järås S., Civera C., Solans C., Kuttuva G. R. Comparison and functionalization study of microemulsion-prepared magnetic iron oxide nanoparticles // *Langmuir.* 2012. Vol. 28. P. 8479–8485.

101. Lee Y., Lee J., Bae C. J., Park J.-G., Noh H.-J., Park J.-H., Hyeon T. Large-Scale synthesis of uniform and crystalline magnetite nanoparticles using reverse micelles as nanoreactors under reflux conditions // *Adv. Funct. Mater.* 2005. Vol. 15. № 3. P. 503–509.

102. Massart R. Preparation of aqueous magnetic liquids in alkaline and acidic media // *IEEE Trans. Magnetic.* 1981. Vol. 17. № 2. P. 1247–1248.

103. Joshi H. H., Pandya P. B., Modi K. B., et al. Magnetic properties of magnesium-cobalt ferrites synthesized by co-precipitation method // *Bull. Materials Sci.* 1997. Vol. 20. № 1. P. 93–101.

104. Hsu W., Chen S. C., Kuo P. C., et al. Preparation of Ni Cu Zn ferrite nanoparticles from chemical co-precipitation method and the magnetic properties after sintering // *Mater. Sci. and Engineering B.* 2004. Vol. 1. № 111. P. 142–149.

105. Коваль А. О. Синтез, дослідження фізико-хімічних властивостей феритів як компонента магнітокерованих лікувальних та діагностичних засобів: дис. ... канд. фармацевт. наук: 15.00.02. Харків, 2009. 154 с.

106. Галыгин В. Е., Баронин Г. С., Таров В. П., Завражин Д. О. Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО ТГТУ, 2012. 180 с.

107. Alexandre M., Dubois P. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials // *Materials Science and Engineering: R: Reports.* 2000. Vol. 28. № 1. P. 1–63.

108. Piozzi A., Francolini I. Editorial of the special issue antimicrobial polymers // *Int. J. Mol. Sci.* 2013. № 14. P. 18002–18008.

109. Jung J. H., Hwang G. B., Lee J. E., Bae G. N. Preparation of airborne Ag/CNT hybrid nanoparticles using an aerosol process and their application to antimicrobial air filtration // *Langmuir.* 2011. № 27 (16). P. 10256–10264.

110. Mudunkotuwa A., Rupasinghe T., Chia-Ming Wu, Grassian V. H. Dissolution of ZnO Nanoparticles at Circumneutral pH: A Study of Size Effects in the Presence and Absence of Citric Acid // *Langmuir.* 2012. Vol. 28. № 1. P. 396–403.

111. Tartaj P., Morales M., Veintemillas-Verdaguer S., et al. The preparation of magnetic nanoparticles for applications in biomedicine // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003. Vol. 1. № 36. P. 182–197.

112. Gupta A. K., Curtis A. Surface modification of superparamagnetic iron oxide nanoparticles and their intracellular uptake // *Eur. Cells and Mater.* 2002. Vol. 4. № 2. P. 101–102.

113. Wu Y., Zuo E., Zheng Z., et al. A novel approach to molecular recognition surface of magnetic nanoparticles based on host-guest effect // *Nanoscale Res. Lett.* 2009. Vol. 1. № 4. P. 738–747.

114. Faraji M., Yamini Y., Rezaee M. Magnetic nanoparticles: synthesis, stabilization, functionalization, characterization, and applications // *J. Iran. Chem. Soc.* 2010. Vol. 7. № 1. P. 1–37.

115. Laurent S., Forge D., Port M., et al. Magnetic iron oxide nanoparticles: synthesis, stabilization, vectorization, physicochemical characterizations, and biological applications // *Chem. Rev.* 2008. Vol. 108. № 6. P. 2064–2110.

116. Федотова А. В., Фролова Ю. В., Сдобникова О. А. Наномодифицированное латексное покрытие для защиты колбасных изделий // *Мясная индустрия.* 2013. № 10. С. 24–26.

117. Espinosa D., Caldelas F., Johnston K., Bryant S. L., Chun H. Nanoparticle-stabilized supercritical CO₂ foams for potential mobility control applications // *SPE Oil Recovery Symposium.* 2010.

118. Hunter T. N., Wanless E. J., Jameson G. J., Pugh R. J. Non-ionic surfactant interactions with hydrophobic nanoparticles: Impact on foam stability // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.* 2009. Vol. 347. P. 81–89.

119. Hunter T. N., Wanless E. J., Jameson G. J. Effect of esterically bonded agents on the monolayer structure and foamability of nano-silica // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.* 2009. Vol. 334. P. 181–190.

120. Saleh N., Sarbu T., Sirk K., Lowry G. V., Matyjaszewski K., Tilton R. D. Oil in water emulsions stabilized by highly charged polyelectrolyte-grafted silica nanoparticles // *Langmuir.* 2005. Vol. 21. № 22. P. 9873–9878.

121. Saigal T., Dong H., Matyjaszewski K., Tilton R. D. Pickering emulsions stabilized by nanoparticles with thermally responsive grafted polymer brushes // *Langmuir.* 2010. Vol. 26. № 19. P. 15200–15209.

122. Worthen A. J., Bryant S. L., Chun H., Johnston K. P. Carbon dioxide-in-water foams stabilized with nanoparticles and surfactant acting in synergy // *AIChE Journal*. 2013. Vol. 59. № 9. P. 3490–3501.

123. Aveyard R., Binks B.P., John H.C. Emulsions stabilised solely by colloidal particles // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2003. Vol. 100–102. P. 503–546.

124. Binks B. P., Whitby C. P. Nanoparticle silica-stabilised oil-in-water emulsions: Improving emulsion stability // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2005. Vol. 253. P. 105–115.

125. Balard H., Papirer E., Khalfi A., Barthel H. Trimethylchlorosilane modified silica surfaces: characterization by inverse gas chromatography using PDMS oligomers as probes // *Compos. Interfaces*. 1998. Vol. 6. № 1. P. 19–25.

126. Binks B. P., Lumsdon S. O. Influence of particle wettability on the type and stability of surfactant-free emulsions // *Langmuir*. 2000. Vol. 16. № 23. P. 8622–8631.

127. Jiang L., Li S., Yu W., Wang J., Sun Q., Li Z. Interfacial study on the interaction between hydrophobic nanoparticles and ionic surfactants // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2016. Vol. 488. P. 20–27.

128. Dickson J. L., Binks B. P., Johnston K. P. Stabilization of carbon dioxide-in-water emulsions with silica nanoparticles // *Langmuir*. 2004. Vol. 20. № 19. P. 7976–7983.

129. Safouane M., Langevin D., Binks B. P. Effect of particle hydrophobicity on the properties of silica particle layers at the air-water interface // *Langmuir*. 2007. Vol. 23. № 23. P. 11546–11553.

130. Tyowua A. T., Yiase S. G., Binks B. P. Double oil-in-oil-in-oil emulsions stabilized solely by particles // *J. Colloid Interface Sci.* 2017. Vol. 488. P. 127–134.

131. Grate J. W., Warner M. G., Pittman J. W., Dehoff K. J., Wietsma T. W., Zhang C., Ostrom M. Silane modification of glass and silica surfaces to obtain equally oilwet surfaces in glass-covered silicon micromodel applications // *Water Resour. Res.* 2013. Vol. 49. P. 4724–4729.

132. Sun Q., Li Z., Li S., Jiang L., Wang J., Wang P. Utilization of surfactant-stabilized foam for enhanced oil recovery by adding nanoparticles // *Energy Fuels*. 2014. Vol. 28. P. 2384–2394.

133. Sun Q., Li Z., Wang J., Li S., Li B., Jiang L., Wang H., Lü Q., Zhang C., Liu W. Aqueous foam stabilized by partially hydrophobic nanoparticles in the presence of surfactant // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2015. Vol. 471. P. 54–64.

134. Arruebo M., Fernández-Pacheco R., Ibarra M. R., Santamaría J. Magnetic nanoparticles for drug delivery // *Nano Today*. 2007. Vol. 2. № 3. P. 22–32.

135. Sun Y., Duan L., Guo Z., et al. An improved way to prepare superparamagnetic magnetite–silica core–shell nanoparticles for possible biological application // *J. Magn. Magn. Mater.* 2005. Vol. 285. № 1/2. P. 65–70.

136. Серов А. В., Шипулин В. И., Шевченко И. М. Антимикробный препарат на основе наносеребра для защиты колбас // *Мясная индустрия*. 2010. № 2. С. 29–32.

137. ДСанПіН 222-96. Державні санітарні правила і норми по застосуванню харчових добавок. Наказ МОЗ. України № 222 від 23.07.1996 р. зі змінами та доповненнями.

138. Олишевский В., Корецкая И., Маринин А., Захаревич В., Марченко А. Использование наноэмульсий при производстве хлебобулочных изделий // *Хранительна наука, техника и технологии – 2013*. 18–19 октомври 2013. Пловдив, 2013. С. 97–100.

139. Senturk Ah., Yalcin B., Otles S. Nanotechnology as a food perspective // *Journal of Nanomaterials & Molecular Nanotechnology*. 2013. Vol. 2. № 6. P.7.

140. Нанотехнологии в сельском хозяйстве / сост. Н. И. Кугутина. Курск: Курская областная научная библиотека им. Н. Н. Асеева, 2012. С. 19.

141. Ramachandraiah K., Sung Gu Ha, Koo Bok Chin. Nanotechnology in Meat Processing and Packaging: Potential Applications – A Review // *Asian Australas. J. Anim. Sci.* 2015. Vol. 28. P. 290–302.

142. Тихомирова Н. А. Нанотехнологии в переработке молочного сыря // Молочная промышленность. 2008. № 4. С. 68–70.

143. Сердюк А. М., Гуліч М. П., Каплуненко В. Г., Косінов М. В. Нанотехнології мікронутрієнтів: проблеми, перспективи та шляхи ліквідації дефіциту макро- та мікроелементів // Журнал Академії медичних наук України. 2010. Т. 16. №3. С. 467–471.

144. Максютов Р. Р. Разработка технологии и товароведная оценка йодобогачённых кумысных напитков с инулином: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.15. Москва, 2014. 136 с.

145. Чахова Е. И. Обогащение продуктов питания пищевыми и биологически активными добавками // Пищевая технология. 2007. № 3. С. 121–122.

146. Шишков Ю. И. Некоторые аспекты продуктов функционального питания // Пищевая промышленность. 2007. № 1. С. 10–11.

147. Шляхто Е. В. Инновационные нанотехнологии в медицине и биологии // Инновации. 2008. № 6 (116). С. 54–59.

148. Choi J. H., et al. Multimodal biomedical imaging with asymmetric single-walled carbon nanotube iron oxide nanoparticle complexes // Nano Lett. 2007. Vol. 7. P. 861–867.

149. Tiwari A., Syvajarvi M. Advanced Materials for Agriculture, Food and Environmental Safety. Wiley: Scrivener, 2014. 528 p.

150. Pavlyuk R., Pogarska V., Timofeyeva N., Bilenko L., Stukonozhenko T. Exploring the processes of cryomechanodestruction and mechanochemistry when devising nano-technologies for the frozen carotenoid plant supplements // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 6, Iss. 11 (84). P. 39–46.

151. Павлюк Р. Ю., Погарська В. В., Біленко Л. М., Погарський О. С., Какадій Ю. П., Гасанова Г. Е., Стуконоженко Т. А. Розробка нового покоління оздоровчих нанопоїв, збагачених каротиноїдними,

хлорофілвмісними, антоціановими нанодобавками // ScienceRise. 2017. № 5 (34). P. 45–51.

152. Онищенко Г. Г., Тутельян В. А. О концепции токсикологических исследований, методологии оценки риска, методов идентификации и количественного определения наноматериалов // Вопросы питания. 2007. Т. 76. № 6. С. 4–8.

153. Онищенко Г. Г., Тутельян В. А., Гмошинский И. В., Хотимченко С. А. Развитие системы оценки безопасности и контроля наноматериалов и нанотехнологий в Российской Федерации // Гигиена и санитария. 2013. № 1. С. 1–8.

154. Гмошинский И. В., Хотимченко С. А., Попов В. О., Дзантиев Б. Б., Жердев А. В., Демин В. Ф., Бузулуков Ю. П. Наноматериалы и нанотехнологии: методы анализа и контроля // Успехи химии / Российская академия наук, Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского. 2013. № 82 (1). С. 48–76.

155. Kondratyeva I. V., Kobasa I. M. Photocatalytic degradation of methylene blue on nanostructured composites based on TiO₂ and polymethyne dye // Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2017): International research and practice conference. Chernivtsi, 2017. P. 82.

156. Sachko A., Kobasa I., Moysyura O. Perspectives of utilization of nanodispersive materials based on SiO₂, TiO₂ and SiO₂-TiO₂ for wine fining // J. Food and Environment Safety. 2017. Vol. 16. Iss. 4. P. 216–221.

157. Попов К. И., Филиппов А. Н., Хуршудян С. А. Пищевые нанотехнологии // Российский химический журнал. 2009. Т. 53. № 2. С. 86–97.

158. Попов К. И., Красноярова О. В. Пищевые нанотехнологии: упаковка // Масложировая промышленность. 2010. Вып. 1. С. 15–17.

159. Попов К. И., Филиппов А. Н. Пищевые нанотехнологии: перспективы и проблемы // Переработка молока. 2010. № 3 (125). С. 6–10.

160. Карпенко Д. В., Уваров Ю. А., Маринин А. И., Олишевский В. В. Влияние наночастиц металлов на сбраживание пивного сусла // Пиво и напитки. 2012. № 1. С. 16–17.
161. Карпенко Д. В., Житков В. В., Карязин С. А. Влияние нанопрепаратов на активность протеаз // Пиво и напитки. 2016. № 4. С. 46–49.
162. Подкопаев Д. О., Шабурова Л. Н., Лабутина Н. В., Суворов О. А., Сидоренко Ю. И., Крайнева О. В. Применение неорганических наночастиц для придания упаковочным материалам антимикробных свойств // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2013. № 4 (21). С. 28.
163. Juganson K., Ivask A., Blinova I., Mortimer M., Kahru A. NanoE-Tox: New and in-depth database concerning ecotoxicity of nanomaterials // Beilstein J. Nanotechnol. 2015. № 6. P. 1788–1804.
164. Mozafari M. R., Flanagan J., Matia-Merino L. Recent trends in the lipid-based nanoencapsulation of antioxidants and their role in foods // J. Sci. Food Agricult. 2006. № 86. P. 2038–2045.
165. Augustin M. A., Hemar Y. Nano- and micro-structured assemblies for encapsulation of food ingredients // Chem. Soc. Rev. 2009. № 38. P. 902–912.
166. Graveland-Bikker J. F., de Kruif C. G. Unique milk protein-based nanotubes: food and nanotechnology meet // Trends Food Sci Technol. 2006. № 17 (5). P. 196–203.
167. Graveland-Bikker J. F., Schaap I. A. T., Schmidt C. F., de Kruif C. G. Structural and mechanical study of a self-assembling protein nanotube // Nano Lett. 2006. № 6 (4). P. 616–621.
168. Graveland-Bikker J. F., Fritz G., Glatter O. Growth and structure of α -lactalbumin nanotubes // J. Appl. Crystallogr. 2006. № 39. P. 180–184.
169. Garti N., Spornath A., Aserin A., Lutz R. Nano-sized self-assemblies of nonionic surfactants as solubilization reservoirs and microreactors for food systems // Soft Matter. 2005. № 1 (3). P. 206–224.

170. Garti N., Shevachman M., Shani A. Solubilization of lycopene in jojoba oil microemulsion // *J. Am Oil Chem. Soc.* 2004. № 81 (9). P. 873–880.

171. Горбунова Н. А., Туняева Е. К. Риски и безопасность использования нанотехнологий пищевых продуктов: обзор // *Теория и практика переработки мяса.* 2016. № 3. С. 35–47.

172. Gunell M., Naaränen J., Brobbey K. J., Saarinen J. J., Toivakka M., Makela J. M., et al. Antimicrobial characterization of silver nanoparticle-coated surfaces by «touch test» method // *Nanotechnology Science and Applications.* 2017. № 10. P. 137–145.

173. Маннино С. Применение нанотехнологии в пищевой промышленности // *Молочная промышленность.* 2010. № 1. С. 40.

174. Кудряшева А. А., А.А. Вербицкая И. И., Оникиенко Е. В. Новые натуральные безопасные корма для выращивания рыбы // *Пищевая промышленность.* 2011. № 4. С. 48–51.

175. Ситар О. В., Новицька Н. В., Таран Н. Ю., Каленська С. М., Ганчурін В. В. Гончар Л. М. Нанотехнології в сучасному сільському господарстві // *Фізика живого, Т.18.* № 3. 2010. С.113-116.

176. Gregoriadis G., Bacon A., Caparros-Wandoney W., et al. Plasmid DNA vaccines: entrapment into liposomes by dehydration-rehydration // *Meth. Enzymol.* 2003. Vol. 367. P. 70–80.

177. Thompson A. K. Liposomes: from concepts to applications // *Food New Zealand.* 2003. Vol. 13. P. 23–32.

178. Benech R. O., Kheadr E. E., Laridi R., et al. Inhibition of *Listeria innocua* in cheddar cheese by addition of nisin Z in liposomes or by in situ production in mixed culture // *Appl. Environ. Microbiol.* 2002. Vol. 68. P. 3683–3690.

179. Garcia M., Alexandre M., Gutierrez J., et al. Electronic nose for wine discrimination // *Sensors Actual B.* 2006. Vol. 113. P. 911–916.

180. Gfeller K. K., Nugaeva N., Hegner M. Micromechanical oscillators as rapid biosensor for the detection of active growth of *Escherichia coli* // *Biosens. Bioelectron.* 2005. Vol. 21. P. 528–533.

181. Prakash A., Sen S., Dixit R. The Emerging Usage and Applications of Nanotechnology in Food Processing Industries: The new age of Nanofood // *Int. J. Pharm. Sci. Rev. Res.* 2013. Vol. 22 (1). № 21. P. 107–111.

182. Pathakoti K., Manubolu M., Hwang H. M. Nanostructures: Current uses and future applications in food science // *Journal of Food and Drug Analysis.* 2017. Vol. 25. Iss. 2. P. 245–253.

183. Федотова А. В., Снежко А. Г., Сдобникова О. А., Самойлова Л. Г., Ананьев В. В., Семенов Г. В. Нанотехнологии и их использование в упаковочной отрасли: учеб. пособие. Москва: МГУПБ, 2008. 98 с.

184. Akhilesh K. Verma, Singh V. P., Pathak Vikas Application of nanotechnology as a tool in animal products processing and marketing: an overview // *American Journal of Food Technology.* 2012. № 7 (8). P. 445–451.

185. Bouwmeester H., Brandhoff P., Marvin H. J., Weigel S., Peters R. J. State of the safety assessment and current use of nanomaterials in food and food production // *Trends in food science & Technology.* 2014. Vol. 40. № 2. С. 200–210.

186. Goyal S., Goyal G. K. Nanotechnology in food packaging a critical review // *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences.* 2012. Vol. 10. № 10. P. 14–24.

187. LaCoste A., Schaich K. M., Zumbrennen D., Yam K. L. Advancing controlled release packaging through smart blending // *Packaging Technology and Science.* 2005. Vol. 18. № 2. P. 77–87.

188. Silvestre C., Duraccio D., Cimmino S. Food packaging based on polymer nanomaterials // *Progress in Polymer Science.* 2011. №36 (12). P. 1766–1782.

189. Huang J. Y., Li X., Zhou W. B. Safety assessment of nanocomposite for food packaging application // *Trends in Food Science & Technology.* 2015. № 45 (2). P. 187–199.

190. Chen K. H., Ye W. J., Cai S. L., Huang L., Zhong T. S., Chen L. K., et al. Green antimicrobial coating based on quaternised chitosan/organic montmorillonite/Ag NPs nanocomposites // Journal of Experimental Nanoscience. 2016. № 11 (17). P. 1360–1371.

191. Kofi J. Brobbey, Janne Haapanen, Jyrki M. Mäkelä, Marianne Gunell, Erkki Eerola, Emil Rosqvist, Jouko Peltonen, Jarkko J. Saarinen, Martti Toivakka. Characterization of flame coated nanoparticle surfaces with antibacterial properties and the heat-induced embedding in thermoplastic-coated paper // SN Applied Sciences. 2019. №1. P. 65 –80.

192. Commission Regulation (EU) № 1183/2012. 2012 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32012R1183>

193. ВОЗ: Информационная записка ИНФОСАН // Нанотехнология. 2008. № 1. 5 с.

194. Nanopackaging is Intelligent, Smart And Safe Life. New World Study By Нкс22.com/beijing Office. Beijing, China Posted on May 14th, 2007 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nanotech-now.com/news.cgi?story_id=22600.

195. Miller Michael B., Supattapone Surachai. Superparamagnetic Nanoparticle Capture of Prions for Amplification // J Virol. 2011, № 85(6). P. 2813–2817.

196. Ян Брюс. Нанотехнології у харчових продуктах: можливості і проблеми. URL:<http://www.nanotsunami.com>

197. Пузир А. П., Буров А. Е., Бондарь В. С., Трусов Ю. Н. Нейтрализация афлатоксина В₁ озонированием и адсорбцией наноалмазами. // Российские нанотехнологии. 2010. Т. 5. № 1/2. С. 122–125.

198. Prasanna P., Shanmuganathan S. Nanotechnology in Food Industry // Bionano Frontier. 2011. Vol. 4 (1). P. 6–11.

199. Nomura H., Katayama K. Development of heterodyne detection of dynamic light scattering enhanced by the Talbot effect for the size measurement of nanoparticles // *Anal. Sci.* 2008. Vol. 24. № 4. P. 459–462.

200. Robson A. A. Nanotechnologies and food: 1st report of session. Evidence // House of Lords-Science and Technology Committee. 2010. Vol. 2. P. 336–361.

201. Satish K. N., Nripen C., Ravi S., Kavita K., et al. Green nanotechnology from tea: phytochemicals in tea as building blocks for production of biocompatible gold nanoparticles // *J. Mater. Chem.* 2009. № 19. P. 2912–2920.

202. Tiede K., et al. Detection and characterization of engineered nanoparticles in food and the environment // *Food Add. Contam.* 2008. Vol. 25. № 7. P. 725–821.

203. Композиция на основе зверобоя: пат. 30934 Казахстан: МПК А61К 36/38, А61К 36/899, А23L 1/052 / Башкирцев А. А., Капасова Р. К. (Казахстан). № 2014/1935.1; заявл. 30.12.2014; опубл. 15.03.2016, Бюл. № 3.4 с.

204. Chaudhry Q., Scotter M., Blackburn J., Ross B., Boxall A., Castle L., Aitken R., Watkins R. Applications and implications of nanotechnologies for the food sector// *Food Additives and Contaminants.* 2008. № 25 (3). P. 241–258.

205. Chaudhry Q., Castle L. Food applications of nanotechnologies: An overview of opportunities and challenges for developing countries // *Trends Food Sci Technol.* 2011. Vol. 22. P. 595–603.

206. Chen H., Weiss J., Shahidi F. Nanotechnology in nutraceuticals and functional foods // *Food Technol.* 2006. Vol. 60. P. 30–36.

207. Ozimek L., Pospiech Ed., Narine S. Nanotechnologies in food and meat processing // *Acta Sci. Pol., Technol. Aliment.* 2010. Vol. 9. P. 401–412.

208. Способ производства хлебобулочных изделий: пат. 30886 Казахстан: МПК А21D 13/04, А21D 13/00 / Башкирцев А. А., Горбатовская Н. А., Шоя Е. Н. (Казахстан). № 2015/0162.1; заявл. 06.02.2015; опубл. 15.03.2016, Бюл. № 2.5 с.

209. Способ производства кисломолочного продукта с нанодобавкой фитомилл овса: пат. 27127 Казахстан: МПК А23С 23/00, А23С 9/13 / Омаралиева А. М., Башкирцев А. А., Орынбасаров А. С., Бектурганова А. А., Алимарданова М. К., Сафуани Ж. Е., Бектурганова А. А. (Казахстан). № 2012/0373.1; заявл. 03.04.2012; опубл. 15.07.2013, Бюл.№ 7.5 с.

210. Способ производства хлебобулочных изделий: пат. 26756 Казахстан: МПК А21D 8/02 / Горбатовская Н. А., Башкирцев А. А., Александрова В. Р. (Казахстан). № 2012/0968.1; заявл. 17.09.2012; опубл. 15.04.2013, Бюл.№ 4.5 с.

211. Функциональный кисломолочный продукт с фитомиллами овса: пат. 24983 Казахстан: МПК А23С 23/00, А23С 9/13 / Усембаева Ж. К., Башкирцев А. А., Бектурганова А. А., Омаралиева А. М., Оспанова З. Н., Сафуани Ж. Е. (Казахстан). № 2010/0303.1; заявл. 16.03.2010; опубл. 15.12.2011, Бюл.№ .5 с.

212. Способ обогащения молочного продукта: пат. 30887 Казахстан: МПК А23С 9/12, А23С 9/13 / Башкирцев А. А., Горбатовская Н. А., Каримова Г. Д., Умирбаева Ш. Д. (Казахстан). № 2014/1834.1; заявл. 12.12.2014; опубл. 15.02.2016, Бюл.№2.4 с.

213. Draft opinion of the potential risks arising from nanoscience and feed safety. Parma, Italy: European Food Safety Authority, 2008. 35 p.

214. Kuzma J., VerHage P. Nanotechnology in agriculture and food production. Washington, DC, USA: Woodrow Wilson International, 2006. 41 p.

215. Paul S. D., Dewangan D. Nanotechnology and Nutraceuticals // J. Nanomater Nanotechnol Nanomed. 2016. № 2 (1). P. 9–12.

216. Baltes M. H. Nanotechnology and food safety. Review article // J. Pharm Belg. 2008. № 63 (1). P. 7–14.

217. Dingman J. Nanotechnology: its impact on food safety // J. Environ Health. 2008. № 70 (6). P. 47–50. PMID:18236938.

218. Ali Z., Zhang C., Zhu J., et al. The Role of Nanotechnology in Food Safety: Current Status and Future Perspective // J. Nanosci Nanotechnol. 2018. Dec. 1, № 18 (12). P. 7983–8002.

219. Shvedova A. A., et al. Exposure to carbon nanotube material: assessment of nanotube cytotoxicity using human keratinocyte cells // J. Toxicol Environ Health A. 2003. № 66 (20). P. 1909–1926.

220. Средство «Арголит» для лечения инфицированных ран: пат. 2245151 РФ: МПК 7А 61 К 33/00 / Блажитко Е. М., Родионов П. П., Бугайченко Н. В., Шорина Г. Н. и др. (РФ). опубл. 20.07.2004, Бюл. № 3.4 с.

221. Полунина О. А. Разработка рецептуры и товароведная оценка потребительских свойств хлеба с серебряным нанобиокомпозитом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2007.

222. Брачихин А. А. Научно-практические аспекты интенсификации технологических процессов с использованием наноактивированных жидких сред при производстве мясопродуктов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Ставрополь, 2009.

223. Кравченко А. В., Черногоров А. Л. Нанотехнологии – новая реальность // Мясные технологии. 2010. № 4. С. 12–13.

224. Иванкин А. Н. Наномикротехнологии включения активных ингредиентов в пищевые концепции // Мясная индустрия. 2010. № 1. С. 23–25.

225. Pradhan N., Singh S., Ojha N., Shrivastava A., Barla A., Rai V., Bose S. Facets of Nanotechnology as Seen in Food Processing, Packaging and Preservation Industry // BioMed Research International. 2015. № (3–4). P. 1–17

226. Alfadul S. M., Elneshwy A. A. Use of nanotechnology in food processing, packaging and safety – review // African Journal of Food Agriculture Nutrition and Development. 2010. Vol. 10. № 6. P. 2719–2739.

227. Ластухін Ю. О. Харчові добавки. Е-коди. Будова. Одержання. Властивості. Львів: Центр Європи, 2009. 836 с.

228. Weir A., Westerhoff P., Fabricius L., Hristovski K., von Goetz N. Titanium dioxide nanoparticles in food and personal care products // *Environmental Science & Technology*. 2012. № 46 (4). P. 2242–2250.

229. Martirosyan A., Schneider Y. J. Engineered nanomaterials in food: Implications for food safety and consumer health // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2014. № 11 (6). P. 5720–5750.

230. Aguilar F., Crebelli R., Di Domenico A., Dusemund B., Frutos M. J., Galtier P., et al. Reevaluation of titanium dioxide (E171) as a food additive // *EFSA Journal*. 2016. № 14 (9). P. 1–83.

231. Xu J., Yang F. M., An X. X., Hu Q. H. Anticarcinogenic activity of selenium-enriched green tea extracts in vivo // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2007. № 55 (13). P. 5349–5353.

232. Coman Cristina. Nanostructured Colloids in Food Science // Open access peer-reviewed chapter. November 5th 2018. DOI: 10.5772/intechopen.79882.

233. Bolognesi C., Castle L., Cravedi J. P., Engel K. H., Franz R., Fowler P., et al. Safety assessment of the substance zinc oxide, nanoparticles, for use in food contact materials. *EFSA Journal*. 2016. № 14 (3). P. 1–8.

234. Inventory of Nanotechnology applications in the agricultural, feed and food sector. 2014 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/sp.efsa.2014.EN-621>.

235. Aschberger K., Gottardo S., Amenta V., Arena M., Botelho Moniz F., Bouwmeester H., Brandhoff P., Mech, A., Quiros Pseudo L., Rausche H., Schoonjans R., Vittoria Vettori M., Peters R. Nanomaterials in Food – urrent and Future Applications and Regulatory Aspects // *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. № 617 (1). P. 75–81.

236. Ognik, K., Cholewinska E., Czech A., Kozlowski K., Wlazlo L., et al. Effect of silver nanoparticles on the immune, redox and lipid status of chicken blood // *Czech. J. Anim. Sci.* 2016. № 61. P. 450–461.

237. Shi L., Xun W., Yue W., Zhang C., Ren Y., et al. Effect of elemental

nano-selenium on feed digestibility, rumen fermentation and purine derivatives in sheep // *Anim. Feed Sci. Technol.* 2011. № 163. P. 136–142.

238. Thangavel G., Thiruvengadam S. Nanotechnology in food industry – A review // *International Journal of ChemTech Research CODEN (USA): IJCRGG.* 2014. Vol. 6. № 9. P. 4096–4101.

239. Galstyan V., Bhandari M. P., Sberveglieri V., Sberveglieri G., Comini E. Metal oxide nanostructures in food applications: Quality control and packaging // *Chemosensors.* 2018. № 6 (2). P. 1–21.

240. Баблюк Е. Наномодифицированные полимерные материалы (перспективы применения в современной упаковке) // *Тара и упаковка.* 2011. № 3. С. 37–39.

241. Подкопаев Д. О. и др. Сравнительная оценка антимикробной активности наночастиц серебра // *Российские нанотехнологии.* 2013. № 11/12. С. 123–126.

242. Радциг М. А., Хмель И. А. Антибактериальные эффекты наночастиц серебра // *Сб. тез. докл. участников Второго Междунар. конкурса науч. работ молодых ученых в области нанотехнологий.* Москва, 2009. С. 805–807.

243. Reed R. B., Higgins C. P., Westerhoff P., et al. ACS Sustainable // *Chem. Eng.* 2014. № 2. P. 1574–1580.

244. Чмутин И. А., Дмитриева М. Б., Яровая М. С. и др. Использование препаратов на основе наночастиц серебра для защиты различных материалов от плесневых грибов // *Нанотехнологии – производству 2009: материалы науч. конф.* Фрязино, 2009. С. 123–124.

245. Grobe A., Rissanen M. E. Nanotechnologies in griculture and food – an overview of different fields of application, risk assessment and public perception // *Recent Pat Food Nutr Agric.* 2012. № 4 (3). P. 176–186.

246. Kalpana S. R., Anshul S., Rao N. H. Nanotechnology in food processing sector – An assessment of emerging trends // *J. Food Sci. Technol.* 2013. № 50 (5). P. 831–841.

247. Perez-Esteve E., Bernardos A., Marinez-Manez R., et al. Nanotechnology in the development of novel functional foods or their package. An overview based in patent analysis // *Recent Pat Food Nutr. Agric.* 2013. № 5 (1). P. 35–43.

248. Duncan T. V. Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: Barrier materials, antimicrobials and sensors // *Journal of Colloid and Interface Science.* 2011. № 363 (1). P. 1–24.

249. Серегин И. Г., Уша Б. В. Лабораторные методы в ветеринарно-санитарной экспертизе пищевого сырья и готовых продуктов. Москва: РАПП, 2008. 408 с.

250. Иванов С. В., Пасичный В. Н., Тимошенко И. В., Марынин А. И. Перспективы использования бетаина свеклы при производстве мясопродуктов // *Вестник Алматинского технологического университета.* 2014. № 4. С. 37–40.

251. Acosta E. Bioavailability of nanoparticles in nutrient and nutraceutical delivery // *Current Opinion in Colloid & Interface Science.* 2009. № 14 (1). P. 3–15.

252. McClements D. J., Decker E. A., Weiss J. Emulsion-based delivery systems for lipophilic bioactive components // *Journal of Food Science.* 2007. № 72 (8). P. 109–124.

253. McClements D. J., Decker E. A., Park Y., Weiss, J. (2009). Structural design principles for delivery of bioactive components in nutraceuticals and functional foods // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition.* 2009. № 49 (6). P. 577–606.

254. Inimfon A. Udoetok, Lee D. Wilsonl, John V. Headley. Stabilization of pickering emulsions by iron oxide nanoparticles. Review Article // *Advanced Materials Science.* 2016. Vol. 1 (1). P. 24–33.

255. Silva H. D., Cerqueira M. A., Vicente A. A. Nanoemulsions for Food Applications: Development and Characterization // *Food Bioprocess Technol.* 2012. № 5. P. 854–867.

256. Perillo P. M., Rodriguez D. F. Low temperature trimethylamine flexible gas sensor based on TiO₂ membrane nanotubes // Journal of Alloys and Compounds. 2016. № 657. P. 765–769.

257. Bouwmeester H., Dekkers S., Noordam M. Y., Hagens W. I., Bulder A. S., Heer C., Voorde S. E. C. G., Wijnhoven S. W. P., Hans J. P., Marvin H. J. P., Sips A. J. A. M. Review of health safety aspects of anotechnologies in food production // Regulatory Toxicology and Pharmacology. 2009. № 53. P. 52–62.

258. Белоусов А. Н. Научно-практический опыт применения наночастиц магнетита в медицине // Вестник НТУ «ХПИ». 2010. С. 9–16.

259. Ведерникова І. О. Синтез, властивості та біологічна активність магнетиту та магнітокерованої рідини: дис. ... канд. фарм. наук: 15.00.02. – Харків, 2006. 133 с.

260. Киршвинк Д., Джонс Д., Мак–Фаден Б. Биогенный магнетит и магниторецепция. Москва: Мир, 1989. Т. 1. 352 с.

261. Киршвинк Д., Джонс Д., Мак–Фаден Б. Биогенный магнетит и магниторецепция. Москва: Мир, 1989. Т. 2. 523 с.

262. Левитин Е. Я., Ведерникова И. А., Цихановская И. В. и др. Исследование электроповерхностных свойств магнетитовых дисперсных систем на водной основе // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2007. № 3/4 (27). С. 16–18.

263. Цихановська І. В., Євлаш В. В., Лазарева Т. А., Шингісов А. У. Дослідження структурно-механічних показників та піноутворення зефірних мас з різними структуроутворювачами при введенні в рецептуру харчової добавки «Магнетофуд» // Праці ТДАУ. Технічні науки. Мелітополь, 2019. Т. 2. Вип. 19. С. 168–189.

264. Александров О. В., Цихановська І. В., Барсова З. В., Дуденко Н. В., Павлоцька Л. Ф., Скуріхіна Л. А. Одержання та дослідження властивостей біологічно-активних добавок на основі ліпідо-магнетитових суспензій // Повноценне харчування: інноваційні аспекти технології, енергоефективного

виробництва, зберігання та маркетингу: колективна монографія. Харків: ХДУХТ, 2015. С. 138–167.

265. Цихановська І. В., Александров О. В., Лазарева Т. А., Гонтар Т. Б., Павлоцька Л. Ф. Використання жиросмагнетитової суспензії для підвищення харчової цінності цукерок «Сухофрукти в шоколаді», збагачених залізовмісною харчовою добавкою // Повноцінне харчування: інноваційні аспекти технології, енергоефективного виробництва, зберігання та маркетингу: колективна монографія. Харків: ХДУХТ, 2016. С. 143–170.

266. Тарасюк Н. Л., Барсова З. В., Цихановська І. В. Технологія отримання олійно-магнетитових суспензій // Хімічні Каразінські читання – 2012 (ХКЧ'12): тези ІХ Всеукр. наук. конф., 23–26 квітня 2012 року / Харківський національний ун-т ім. В. Н. Каразіна. Харків, 2012. С. 326–327.

267. Tsykhanovska I., Alexandrov A., Gontar T., Kokodiy N., Dotsenko N. Stability and morphological characteristics of lipid-magnetite suspensions, // Eureka: Life Sciences. 2016, Vol. 3. № 3. P. 14–25.

268. Tsykhanovska I., Alexandrov A., Gontar T., Kokodiy N., Dotsenko N. The study of nanoparticles of magnetite of the lipid-magnetite suspensions by methods of photometry and electronic microscopy // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2016. Vol 4. № 11 (82). P. 51–61.

269. Alexandrov A., Tsykhanovska I., Gontar T., Kokodiy N. Research of sedimentation stability of lipid-magnetite suspensions by the method of spectrophotometry // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2016. Vol 3, № 11 (81). P. 4–15.

270. ДСТУ 46.004-99. Борошно пшеничне. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 1999. 27 с.

271. ГОСТ 7045-90. Мука ржаная хлебопекарная. Технические условия. М.: Стандартиформ, 1990. 4 с.

272. ГОСТ 31645-2012. Мука для продуктов детского питания. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2013. 12 с.

273. ТУ У 10.8-2023017824-001:2018. Добавка харчова на основі оксидів заліза «Магнетофуд». Технічні умови. Харків: УПА, 2018. 32 с.
274. ДСТУ 4812:2007 Дріжджі хлібопекарські пресовані. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2007. 3 с.
275. ДСТУ 3583–97. Сіль кухонна. Загальні технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 1998. 16 с.
276. ДСТУ 4623:2006. Цукор білий. Технічні умови. [замість ГОСТ 21 - 94. Чинний від 29.06.06]. К.: Держспоживстандарт України, 2007. 14 с.
277. ДСТУ 4497:2005 Мед натуральний. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2007. 12 с.
278. ДСТУ 4465:2005 Маргарин. Загальні технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2006. 20 с.
279. ДСТУ 8719:2017 Продукти яєчні. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2019. 15 с.
280. ГОСТ 2156-76. Натрий двууглекислый. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 1977. 16 с.
281. ГОСТ 9325-79. Соли углеаммонийные. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 1980. 6 с.
282. ГОСТ 29049-91. Пряности. Корица. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2011. 6 с.
283. ДСТУ 4399:2005 Масло вершкове. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2006. 14 с.
284. ДСТУ 7525:2014 Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості. К.: Держспоживстандарт України, 2015. 12 с.
285. ГОСТ 6709-72. Вода дистиллированная. Технические условия. [Взамен ГОСТ 6709 - 53 - 86 Введ. 01.01.74]. М.: Стандартиформ, 2007. 11 с.
286. ГОСТ 6882-88. Виноград сушеный. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 1989. 6 с.
287. ДСТУ 1009:2005. Цукор ванільний. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2006. 8 с.

288. ДСТУ 4554:2006. Сир кисломолочний. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2007. 12 с.
289. ДСТУ 4418:2005. Сметана. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2006. 12 с.
290. ДСТУ 7179:2010. Малина свіжа. Технічні умови. З поправкою. К.: Держспоживстандарт України, 2011. 10 с.
291. ДСТУ 8319:2015. Смородина чорна свіжа. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2017. 12 с.
292. ДСТУ 7075:2009. Яблука свіжі для промислового переробляння. Загальні технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2011. 11 с.
293. ГОСТ 11293-89. Желатин. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 1989. 26 с.
294. ДСТУ 7653:2014. Суниця свіжа. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2015. 7 с.
295. ГОСТ 21920-2015. Слива свежая для промышленной переработки. Технические условия (с Поправкой). М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.
296. ДСТУ 8719:2017 Продукти яєчні. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2019. 14 с.
297. ДСТУ 4589:2006. Напівфабрикати м'ясні натуральні від комплексного ділення яловичини за кулінарним призначенням. К.: Держспоживстандарт України, 2007. 12 с.
298. ДСТУ 7517:2014 Хліб із пшеничного борошна. Загальні технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2015. 14 с.
299. ДСТУ 2661:2010. Молоко коров'яче питне. Загальні технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2011. 16 с.
300. ДСТУ 8708:2017 Сухарі панірувальні. Загальні технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2018. 14 с.
301. ДСТУ 4463:2005. Маргарини, жири кондитерські та для молочної промисловості. К.: Держспоживстандарт України, 2006. 35 с.

302. ДСТУ ISO 959-1:2008, Перець (*Piper nigrum* L.) горошком чи змелений. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2010. 12 с.
303. ДСТУ 4424:2005. М'ясна промисловість виробництво м'ясних продуктів. К.: Держспоживстандарт України, 2006. 20 с.
304. ДСТУ 4498:2005 Патока крохмальна. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2006. 25 с.
305. ГОСТ 16280-2002. Агар пищевой. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 20 с.
306. ДСТУ 6088: 2009. Пектин. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2009. 30 с.
307. ДСТУ ГОСТ 908:2006. Кислота лимонна моногідрат харчова. Технічні умови. [Чинний від 26.05.04.]. М.: Стандартиформ, 2007. 24 с.
308. ГОСТ 31642-2012. Добавки пищевые. Натрий молочнокислый (лактат натрия) E325. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2012. 16 с.
309. ДСТУ 4716:2007. Есенції ароматичні харчові для лікеро-горілчаного виробництва. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2007. 11 с.
310. ДСТУ 3845-99. Барвники натуральні харчові. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2000. 18 с.
311. ДСТУ 4621:2006 Кислота молочна харчова. Загальні технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2000. 29 с.
312. ДСТУ 2904-94 (ГОСТ 857-95) Кислота соляная синтетическая техническая. Технические условия. К.: Держспоживстандарт України, 1996. 20 с.
313. ДСТУ 5065:2008 Олія оливкова. Технічні умови постачання. К.: Держспоживстандарт України, 2008. 19 с.
314. ДСТУ 4534:2006 Олія соєва. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2008. 29 с.
315. ДСТУ ГОСТ 8808:2003 Олія кукурудзяна. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2003. 12 с.

316. ДСТУ 4492:2005. Олія соняшникова. Технічні умови. [замість ГОСТ 1129 – 93. Чинний від 01.01.07]. К.: Держспоживстандарт України, 2006. 22 с.

317. ГОСТ 25292-2017. Жиры животные топленые пищевые. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2017. 11 с.

318. ДСТУ 5040:2008. Саломаси нерафіновані та рафіновані. Технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2009. 21 с.

319. ГОСТ 6441-2014 Изделия кондитерские пастильные. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2015. 22 с.

320. ДСТУ 4333:2004. Мармелад Загальні технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2004. 18 с.

321. ДСТУ 4437:2005. Напівфабрикати м'ясні та м'ясорослинні посічені. Технічні умови (Надано чинності: наказ Держспоживстандарту України від 15 липня 2005 р. № 175. Поправки: ІПС № 7-2006, ІПС № 2 9-2006, ІПС № 3-2009. Зміна № 1 чинна з 01.04.2008 р. Зміна № 2 чинна з 01.03.2009 р.). К.: Держспоживстандарт України, 2006. 34 с.

322. ГОСТ 5904:2009. Изделия кондитерские. Правила приемки, методы отбора и подготовки проб. К.: Госстандарт Украины, 2009. 9 с.

323. ДСТУ 4683:2006. Вироби кондитерські. К.: Держспоживстандарт України, 2008. 20 с.

324. ДСТУ 4582:2006. Хліб із житнього та суміші житнього і пшеничного борошна. Загальні технічні умови. К.: Держспоживстандарт України, 2006. 12 с.

325. ГОСТ 30390-95. Громадське харчування. Кулінарна продукція, яка реалізується населенню. Загальні технічні умови. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. 26 с.

326. ДСТУ 4834:2007. Молоко та молочні продукти. Правила приймання, відбирання та готування проб до контролю. [Взамін ГОСТ 26809–86; Чинний від 10.10.07]. К.: Держспоживстандарт України, 2007. 18 с.

327. ДСТУ 7670:2014. Сировина і продукти харчові. Готування проб. Мінералізація для визначання вмісту токсичних елементів. [Чинний від 01.07.15]. К.: Держспоживстандарт України, 2015. 21 с.

328. ГОСТ 26809.2–2014. Молоко и молочная продукция. Правила приемки, методы отбора и подготовка проб к анализу. Часть 1. Масло из коровьего молока, спреды, сыры и сырные продукты, плавленые сыры и плавленые сырные продукты. [Взамен ГОСТ 26809-86. Введ. 01.01.16]. М.: Стандартинформ, 2014. 13 с.

329. ГОСТ 26668-85. Продукты пищевые и вкусовые. Методы отбора проб для микробиологических анализов. М. : Изд-во стандартов, 1985. 5 с.

330. ГОСТ 32190:2013. Масла растительные. Правила приемки и методы отбора проб. К.: Госстандарт Украины, 2013. 10 с.

331. ДСТУ ISO 5555:2003. Жири та олії тваринні та рослинні. Відбір проб (ISO 555-1991). К.: Держспоживстандарт України, 2003. 28 с.

332. Шарло Г. Методы аналитической химии. Количественный анализ неорганических соединений. Москва, Ленинград: Химия, 1965. 626 с.

333. Методика фотометричного визначення заліза ($^{3+}$) та заліза ($^{2+}$) з сульфосаліциловою кислотою в стічних водах (КНД 211.1.4.040-95) // МОНПС та ЯБ України. Київ, 1995. 12 с.

334. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Gontar T. Dissolution kinetics of Fe_3O_4 nanoparticles in the acid media // Chemistry & Chemical technology. Chemistry. Lviv, 2019. Vol. 13. № 2, P. 170–184.

335. Лосев Н. Ф., Смагунова А. Н. Основы рентгеноспектрального рентгенофлуоресцентного анализа. Москва: Химия, 1982. 208 с.

336. Lachance G. R., Claisse F., Quantitative H. Quantitative X-Ray fluorescence analysis: theory and application. New York: Wiley, 1995. 400 p.

337. Guskos N., Typek J., Bodziony T., et al. Temperature dependence of FMR field of magnetic nanoparticles/polymer composite // Rev. Adv. Mater. Sci. 2006. Vol. 1. № 12. P. 133–138.

338. Guskos N., Anagnostakis E. A., Guskos A. FMR study of magnetic nanoparticles embedded in non-magnetic matrix // J. Achievements in Mater. and Manufacturing Engineering. 2007. Vol. 24. № 1. P. 26–35.

339. Сорокина О. Н. Электронный магнитный резонанс дисперсий магнитных наночастиц: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.04. М., 2009. 145 с.

340. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Gontar T., Shmatkov D. The study of the interaction mechanism of linoleic acid and 1-linoleyl-2-oleoyl-3-linolenoyl-glycerol with Fe₃O₄ nanoparticles // Chemistry & Chemical technology. Chemistry. Lviv. 2019. Vol. 13. № 3. P. 303–316.

341. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Gontar T. Mechanism of fat-binding and fat-contenting of the nanoparticles of a food supplement on the basis of double oxide of two- and trivalent iron // Ukrainian food journal. 2018. Vol. 7. Iss. 4. P. 702–715.

342. Prodan A. M., Iconaru S. L., Iobanu C. S., Chifiriuc M.C., Stoicea M., Predoi D. Iron Oxide Magnetic Nanoparticles: Characterization and Toxicity Evaluation by in Vitro and in Vivo Assays. Journal of Nanomaterials. 2013. Vol. 2013. P. 1–10.

343. Берг Л. Г. Практическое руководство по термографии. Казань: Изд-во Каз. ун-та, 1976. 222 с.

344. Левитин Е. Я., Ведерникова И. А., Оноприенко Т. А., Цихановская И. В. Изучение структуры и температурных превращений синтезированных частиц магнетита // Фармаком. 2007. № 1. С. 61–63.

345. Бокий Г. Б., Порай-Кошиц М. А. Рентгеноструктурный анализ. Москва: Изд-во МГУ, 1964. 582 с.

346. PDF-4/Full File. Entries released in four PDF-4 / Products International Centre for Diffraction Data (ICDD). URL: http://www.icdd.com/resources/PDF4Tutorial_files/slide0087.htm.

347. ГОСТ 8.377–80. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик. М.: Изд-во стандартов. 1981. 21 с.

348. Борисенко Н. В., Богатырев В. М., Дубровин И. В., Абрамов Н. В., Гаевая М. В., Горбик П. П. Синтез и свойства магниточувствительных нанокomпозитов на основе оксидов железа и кремния // Физикохимия наноматериалов и супрамолекулярных структур. К.: Наук. думка, 2007. Т. 1. С. 394–406.

349. Циганок Л. П., Бубель Т. О., Вишнікін А. Б., Вашкевич О. Ю. Аналітична хімія. Хімічні методи аналізу: навч. посібник. Дніпропетровськ: ДНУ ім. О. Гончара, 2014. 252 с.

350. ДСТУ 6045:2008. Фрукты, овощи и продукты переработки, консервы мясные и мясо-растительные. Метод определения рН. К.: Держспоживстандарт Украины, 2009. 12 с.

351. ГОСТ 25555.0–82. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения титруемой кислотности. М.: Изд-во стандартов, 2002. 4 с.

352. ГОСТ 3624–92. Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности. К.: Изд-во стандартов, 1992. 12 с.

353. Воюцкий С. С. Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1975. 512 с.

354. Левитин Е. Я., Ведерникова И. А., Цихановская И. В. и др. Магнитные жидкости: исследование седиментационной и агрегативной устойчивости // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2007. № 3/4 (27). С. 22–26.

355. Цихановська І. В., Барсова З. В., Александров О. В., Ілюха М. Г. Визначення ефективності використання магнетиту в ліпідно-магнетитових суспензіях // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 3/6 (69). С. 4–8.

356. Цихановська І. В., Денисова А. Ю., Левітін Є. Я., Ілюха М. Г., Тимофеева В. П., Александров О. В., Барсова З. В. Магнітні рідини. Очищення вод від нафтопродуктів // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. № 1/6 (61). С. 28–31.

357. Sun J., Zhou S., Hou P., et al. Synthesis and characterization of biocompatible Fe₃O₄ nanoparticles // J. Biomed. Mater. Res. A. 2006. Vol. 1. № 10. P. 333–341.

358. Hong R. Y., Pan T. T., Han Y. P., et al. Magnetic field synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles used as a precursor of ferrofluids // J. Magn. Magn. Mater. 2007. Vol. 1. № 310. P. 37–47.

359. Wang L. S., Hong R. Y. Synthesis, surface modification and characterisation of nanoparticles // Advances in Nanocomposites. 2008. Vol. 1. № 34. P. 289–322.

360. Авраменко В. Н., Ельсон Н. П., Заика А. Инфракрасные спектры пищевых продуктов. М.: Пищевая пром-сть, 1974. 174 с.

361. Максимов А. С., Черных В. Я. Лабораторный практикум по реологии сырья, полуфабрикатов и готовых изделий хлебопекарного, макаронного и кондитерского производств. М.: Издат. комплекс МГУПП, 2004. 162 с.

362. Солодов В. С., Папин А. В., Косинцев В. И., Сечин А. И., Макаревич Е. А. Методика определения краевого угла смачивания для веществ с низкой температурой кристаллизации // Химическая технология. 2013. № 3. С. 106–109.

363. Денисова А. Ю., Цихановская И. В., Скородумова О. Б., Левитин Е. Я., Коваленко В. А., Александров А. В., Барсова З. В. Изучение растворимости магнетита в условиях, имитирующих пищеварительные процессы желудочно-кишечного тракта // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Т. 6. № 6 (60). С. 29–31.

364. ДСТУ 4350:2004. Олії. Методи визначання кислотного числа (ISO 660: 1996, NEQ), К.: Держспоживстандарт України, 2004. 12 с.

365. ДСТУ ISO 3960–2001. Жири та олії тваринні і рослинні. Визначення пероксидного числа. К.: Держспоживстандарт України, 2001. 11 с.

366. ДСТУ 4569:2006. Жири та олії тваринні і рослинні. Визначення йодного числа. К.: Держспоживстандарт України, 2006. 13 с.

367. Гурова Н. В. Разработка методов оценки эмульсионных свойств белков и их применение в пищевых технологиях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.04. М., 1991. 24 с.

368. Гурова Н. В., Токаев Э. С., Гуров А. Н., Толстогузов В. Б. Концентрационная зависимость точки инверсии фаз как характеристика эмульгирующих свойств белков. 1. Нормативные кривые // Труды Всесоюз. семинара по коллоидной химии и физико-химической механике пищевых и биоактивных дисперсных систем. М.: Наука, 1989–1990. С. 109–122.

369. Антипова Л. В., Глотова И. А., Рогов И. А. Методы исследования мяса и мясных продуктов. М.: Колос, 2001. 571с.

370. Журавская Н. К., Гутник Б. Е., Журавская Н. А. Технохимический контроль производства мяса и мясопродуктов. М.: Колос, 1999. 176 с.

371. ГОСТ 5900-73. Изделия кондитерские. Методы определения влаги и сухих веществ. М.: Изд-во стандартов, 1974. 6 с.

372. Ловачева Г. Н., Мглинец А. И., Успенская Н. Р. Стандартизация и контроль качества продукции. М.: Экономика, 1990. 237 с.

373. ГОСТ 9793-74. Продукты мясные. Методы определения влаги. М.: Изд-во стандартов, 1974. 6 с.

374. Корячкина С. Я., Березина Н. А., Хмелева Е. В. Методы исследования качества хлебобулочных изделий: учебно-метод. пособие для вузов. Орел: ОрелГТУ, 2010. 166 с.

375. Касымова Ч. К. Лабораторный практикум по курсу «Технология хлеба, кондитерских и макаронных изделий». Бишкек: Кыргызский гос. техн. ун-т им. И. Раззакова, 2012. 48 с.

376. Крайнюк Л. Н., Савгира Ю. А., Позднякова Е. Б., Янчева М. А. К вопросу о совершенствовании методики определения водосвязывающей способности мяса и мясопродуктов // Прогресивні технології та удосконалення процесів харчових виробництв: зб. наук. праць / ХДАТОХ. Харків, 2000. Ч.1. С. 119–123.

377. Александров А. В., Цихановская И. В., Барсова З. В. Синтез и

исследование кинетики растворения магнетита в модельных средах // Технологічний аудит та резерви виробництва. 2015. № 5/7 (25). С. 31–32.

378. Svidlo K. V., Peresichnyi M. I. Technology of functional public catering foods with dietary additives // Proceedings of 11th International Congress on Engineering and Food «Food Process in Changing World», 22-26 May 2011 / National Technical University of Athens, School of Chemical Engineering. Athens, 2011. P. 2035–2037.

379. Дьяков А. Г., Торяник А. И., Свидло К. В., Липовой Д. В. Исследование влагосодержания шрота и клетчатки овса и проектирование на их основе технологии смузи геродиетического назначения // Процессы и аппараты пищевых производств. Санкт-Петербург: СПбГУНиПТ, 2013. № 1 (март). 10 с. URL: <http://processes.open-mechanics.com/>

380. Корячкина С. Я., Березина Н. А., Хмелева Е. В. Методы исследования свойств сырья, полуфабрикатов и готовой продукции. Методы исследования свойств растительного сырья: учебно-метод. пособие для высшего проф. образования / Орел: ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», 2011. 297 с.

381. Кабачний В. І., Грицан Л. Д., Томаровська Т. О. та ін. Фізична та колоїдна хімія: базовий підруч. для студ. вищ. фарм. навч. закл. (фарм. ф-тів) IV рівня акредитації. 2-ге вид., перероб. та доп. Харків: НФаУ, 2015. 432 с.

382. Рензьева Т. В., Позняковский В. М. Водоудерживающая способность сырья и пищевых добавок в производстве мучных кондитерских изделий // Хранение и переработка сельхозсырья. 2009. № 8. С. 35–38.

383. Рихтер М., Аугустат З., Ширбаум Ф. Избранные методы исследования крахмала. М.: Пищевая пром-сть, 1975. 183 с.

384. Кафка Б. В., Лурье И. С. Технологический контроль кондитерского производства. М.: Пищевая пром-сть, 1988. С. 207–208.

385. Юрчак В. Г., Берзина Н. И., Шмаровоз В. М., Прищепя М. П. Определение связанной воды индикаторным методом в хлебопекарном производстве // Известия вузов. Пищевая технология. 1989. № 4. С. 78–80.

386. Нилова Л. П., Калинина И. В., Науменко Н. В. Метод дифференциально-термического анализа в оценке качества пищевых продуктов // Вестник ЮУрГУ. Пищевые и биотехнологии. Челябинск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 2013. Т. 1. № 1. С 43–49.

387. Перцевий Ф. В., Гурський П. В. Дослідження процесу плавлення сирної пасти за допомогою дериватографа Q-1000 // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі: зб. наук. праць / ХДУХТ, 2005. Вип. 2. С. 35–41.

388. Нилова Л. П., Калинина И. В., Науменко Н. В. Состояние воды в хлебе как фактор сохранения его свежести // Вестник ЮжноУральского государственного университета. Серия: Рынок: теория и практика, 2006. Вып. 3. №4 (59). С. 111–116.

389. Півоваров О. А. Дериватографічні дослідження тіста, приготованого з використанням плазмохімічно активованих водних розчинів // Харчова наука і технологія. 2011. № 3 (16). С. 69–72.

390. Остриков А. Н. Определение форм связи влаги в перце методом дифференциально-термического анализа // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2005. № 1. С. 94–95.

391. Пименова Л. Н. Термография. Методические указания по лабораторной работе по дисциплине «Физико-химические методы исследования». Томск: Изд-во Томск. архит.-строит. ун-та, 2005. 19 с.

392. Alexandrov A., Tsykhanovska I., Evlash V., Lazareva T., Svidlo K., Gontar T., Yurchenko L., Pavlotska L. Investigation of the moisture-retaining power of rye-wheat gluten and flour with polyfunctional food supplement «Magnetofood» // Eureka: Life Sciences. 2018. Vol. 2(14). № 2. P.67–76.

393. Купина Е. Э., Осипова Е. В., Бачище Е. В. Разработка методики и оценка липидосвязывающей способности энтеросорбентов – пищевых

волокон *in vitro* // Рыбная промышленность. 2004. № 3. С. 44–46.

394. Дробот В. І. Лабораторний практикум з технології хлібопекарського та макаронного виробництва. Київ: ЛОГОС, 2006. 341 с.

395. Методы анализа пищевых сельскохозяйственных продуктов и медицинских препаратов. М.: Пищевая пром-сть, 1974. 743 с.

396. ДСТУ ISO 21415-1:2009 (ISO 21415-1:2006, IDT). Пшениця і пшеничне борошно. Вміст клейковини. Ч. 1. Визначання сирової клейковини ручним способом. Київ: Держстандарт України, 2006. 12 с.

397. Агафонова Л. Г., Агафонова О. С. Туризм, готельний та ресторанний бізнес: ціноутворення, конкуренція, державне регулювання: навч. посібник. К.: Знання України, 2002. 352 с.

398. Боташева Г. Ю. Технологія виробництва хлібобулочних виробів: методичні вказівки для самостійної роботи студентів напряму підготовки 151000.62 Технологічні машини та обладнання / Г. Ю. Боташева. Черкеськ: БІЦ СевКавГГТА, 2013. 43 с.

399. Покровский А. А., Ертанов И. Д. Атакуемость белков пищевых продуктов протеолитическими ферментами «*in vitro*» // Вопросы питания. 1965. № 3. С. 38–44.

400. Сторожук П. Г. Гидролитическое расщепление белковых продуктов животного происхождения некоторыми протеолитическими ферментами желудочно-кишечного тракта // Вопросы питания. 1970. № 4. С. 3–8.

401. ДСТУ 5023:2008. Вироби кондитерські борошняні. Метод визначання здатності до намокання. К.: Держспоживстандарт України, 2010. 12 с.

402. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Khamitova B., Svidlo K., Nechuiviter O. Forming the structure of whipped desserts when introducing the food additive «Magnetofood» to their formulation // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. № 2/11 (98). P. 45–55.

403. Горальчук А. Б., Пивоваров П. П., Гринченко О. О. Реологічні методи дослідження сировини і харчових продуктів та автоматизація

розрахунків реологічних характеристик: навч. посібник. Харків: ХДУХТ, 2006. 63 с.

404. Пивоваров П. П., Погожих М. І., Полевич В. В. та ін. Методичний посібник з реологічних методів дослідження сировини та харчових продуктів, автоматизація розрахунків реологічних характеристик. Харків: ХДУХТ, 2006. 150 с.

405. Реотест: инструкция по эксплуатации. ГДР, 1978.

406. ГОСТ 26185-94. Водоросли морские, травы морские и продукты их переработки. Методы анализа. К: Госстандарт Украины с дополнениями, 1994. 16с.

407. Буряк Л. І. Методичні рекомендації з оцінки якості зерна селекційного матеріалу. Харків : Ін-т рослинництва ім. В. Я. Юр'єва, 2011. С. 32–39, 53–58.

408. Ловачева Г. Н., Мглинец А. И., Успенская Н. Р. Стандартизация и контроль качества продукции. Москва: Экономика, 1990. 237 с.

409. Олифирова А. П. Органолептический анализ пищевых продуктов // Улан-Эде.: изд-во ВСГТУ, 2005. 192 с.

410. Вытовтов А. А. Теоретические и практические основы органолептического анализа продуктов питания// СПб.: ГИОРД, 2010. 232 с.

411. Дослідження сенсорне. Методологія. Загальні настанови. (ISO 6658:1985, IDT) : ДСТУ ISO 6658:2005. К.: Держспоживстандарт України, 2006. 26 с.

412. ISO 11036:1994. Сенсорный анализ. Методология. Метод профиля текстуры [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.ars_russia.com.

413. ДСТУ ISO 11035:2005. Дослідження сенсорне. Ідентифікація та вибирання дескрипторів для створення сенсорного спектру за багатобічного підходу (ISO 11035:1994, IDT). К.: Держспоживстандарт України, 2005. 32 с.

414. ГОСТ 26669-85. Продукты пищевые и вкусовые. Подготовка проб для микробиологических анализов. М.: Изд-во стандартов, 1985. 9 с.

415. ГОСТ 10444.15–94. Продукты пищевые. Метод определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; К.: Госстандарт Украины, 1996. 11 с.

416. ГОСТ 30518:97 Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества бактерий группы кишечных палочек (колиформных бактерий). М.: Изд-во стандартов, 1997. 7 с.

417. ГОСТ 10444.2–94. Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества *Staphylococcus aureus*. Введ. 01.01.96. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М.: Изд-во стандартов, 1995. 18 с.

418. ДСТУ ISO 6579:2006. Мікробіологія харчових продуктів і кормів для тварин. Методика виявлення *Salmonella* spp. Чинний від 2008-10-01. К.: Держспоживстандарт України, 2004. 23 с.

419. ГОСТ 10444.12:2013. Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Метод выявления и подсчета количества дрожжей и плесневых грибов. Введ. 01.07. 2015. М.: Стандартиформ, 2014. 9 с.

420. ДСТУ ISO 4831:2006. Мікробіологія харчових продуктів і кормів для тварин. Загальні настанови щодо підрахування кількості колиформних мікроорганізмів. Методика найвірогіднішої кількості. К.: Держспоживстандарт України, 2007. 16 с.

421. ГОСТ 29185-91. Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества сульфитредуцирующих клостридий. Введ. 01.01. 93. М.: Изд-во стандартов, 1992. 8с.

422. ГОСТ 10444.8-88. Продукты пищевые. Методы определения *Bacillus cereus*. Введ. 01.01. 90. М.: Изд-во стандартов, 1988. 13с.

423. ГОСТ 26929-94. Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов. М.: Изд-во стандартов, 1994. 12 с.

424. ГОСТ 26927:86. Сырье и продукты пищевые. Метод определения ртути. Введ. 01.12.86.м М.: Изд-во стандартов, 1986. 15 с.

425. ГОСТ 26928:86. Сырье и продукты пищевые. Методы определения железа. Введ. 01.03.86 М.: Изд-во стандартов, 1986. 5 с.

426. ГОСТ 26930:86. Сырье и продукты пищевые. Метод определения мышьяка. Введ. 01.01.87. М.: Изд-во стандартов, 1986. 7 с.

427. ГОСТ 26931–86. Сырье и продукты пищевые. Метод определения меди. Введ. 01.12.86. М.: Изд-во стандартов, 1986. 14 с.

428. ГОСТ 26932–86. Сырье и продукты пищевые. Метод определения свинца. Введ. 1986-12-01. М.: Изд-во стандартов, 1986. 9 с.

429. ГОСТ 26933–86. Сырье и продукты пищевые. Метод определения кадмия. Введ. 1986-12-01. М.: Изд-во стандартов, 1986. 9 с.

430. ГОСТ 26934–86. Сырье и продукты пищевые. Метод определения цинка. Введ. 1986-06-25. М.: Изд-во стандартов, 1986. 8 с.

431. Kruhlova O., Yevlash V., Tsykhanovska I., Alexandrov A., Yevlash T. SWOT Analysis of innovative products containing food additive «Magnetofood» // Технологічний аудит та резерви виробництва. 2019. № 3/4 (47). С. 4–11.

432. Kruhlova O., Yevlash T., Evlash V., Tsykhanovska I., Potapov V. Comprehensive analysis of food production efficiency using nanoparticles of nutritional supplements on the basis of oxides of two and three valence iron «Magnetofood» // Ukrainian Food Journal. 2019. Vol. 8. Iss. 2. P. 400–416.

433. Цихановська І. В. Євлаш В. В., Круглова О. А., Євлаш Т. О. Економічна ефективність упровадження у виробництво інноваційної продукції // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: тези Міжнар. наук.-практ. конф., 15 травня 2019 р.: у 2 ч. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2019. С. 25–26.

434. Денисова А. Ю., Цихановская И. В., Скородумова О. Б., Тарасюк Н. Л. Разработка устойчивой липидо-магнетитовой суспензии // Актуальні проблеми харчової промисловості та ресторанного господарства.

Сучасні питання підготовки кадрів: матеріали I Всеукр. наук.-практ. конф., 12–13 квітня 2012 р. / Луганський національний ун-т ім. Тараса Шевченка. Луганськ, 2012. С. 155–160.

435. Tajirov A., Cihanovskaja I. V., Barsova Z. V., Puoykha N. G. Chemistry and technology of magnetite and barium-containing composite materials on its basis // International Conference on European Science and Technology: materials of II International research and practice conference, 9th – 10th May 2012. Wiesbaden, 2012. S. 80–87.

436. Цихановська І. В., Денисова А. Ю., Скородумова О. Б., Гончаренко Я. М. та ін. Дослідження впливу жирно-магнетитової суспензії на термін зберігання тваринних жирів // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфері торгівлі та послуг: тези Міжнар. наук.-практ. конф., 19 листопада 2013 р.: у 2 ч. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2013. С. 39.

437. Цихановська І. В., Павлоцька Л. Ф., Денисова А. Ю., Скородумова О. Б. та ін. Дослідження стійкості комплексної харчової добавки спектро-фотометричним методом // Les problemes contemporains de la technosphere et de la formation des cadres d'ingenieurs. Recueil des exposes des participants: materials of VII Internationale Scientifique Conference et methodique, 08–17 octobre 2013. Donetsk, 2013. P. 180–184.

438. Цихановська І., Сніжко А., Денисова А., Скородумова О. Розробка комплексної харчової добавки на основі стабілізованих ліпідно-магнетитових суспензій // Львівські хімічні читання – 2013: тези XIV наук. конф., 26–29 травня 2013 р. / Львівський національний ун-т ім. Івана Франка. Львів, 2013. С. 186.

439. Цихановська І. В., Чуракова В. М., Ілюха М. Г., Барсова З. В. Використання методу хімічної конденсації для синтезу частинок магнетиту – об'єктів нанотехнологій // Хімічні Каразінські читання – 2014 (ХКЧ'14): тези VI Всеукр. наук. конф., 22–24 квітня 2014 р. / Харківський національний ун-т

ім. В. Н. Каразіна. Харків, 2014. С. 293–294.

440. Цихановська І. В., Бершадський Б. В., Барсова З. В., Александров О. В. та ін. Дослідження процесів окиснювальних та термічних перетворень в системі «оліє–ліпідо–магнетитова суспензія» // Хімічні Каразінські читання – 2015 (ХКЧ'15): тези VII Всеукр. конф. 20–22 квітня 2015 р. / Харківський національний ун-т ім. В. Н. Каразіна. Харків, 2015. С. 117–118.

441. Скородумова О. Б., Цихановская И. В., Денисова А. Ю. Изучение растворимости ультратонкого магнетита в отделах ЖКТ // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг: тези Міжнар. наук.-практ. конф., 18 жовтня 2012 р.: у 2 ч. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2012. С. 88–89.

442. Цихановська І. В., Босенко В. О., Павлоцька Л. Ф., Коваленко В. О. та ін. Підвищення біологічної та харчової цінності кулінарних виробів // Інноваційні технології розвитку у сфері харчових виробництв готельно-ресторанного бізнесу, економіки та підприємництва: наукові пошуки молоді: тези Всеукр. наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів, 2 квітня 2015 р. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2015. Ч. 1. С. 111.

443. Александров О. В., Цихановська І. В., Павлоцька Л. Ф., Цибань Л. С. Якість магнетито-ліпідних емульсій і перспективи їх використання // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: тези Міжнар. наук.-практ. конф., 19 травня 2016 р. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2016. С. 387–388.

444. Цихановская И. В. Бершадский Б. Я., Барсова З. В. Оценка устойчивости липидо-магнетитовых суспензий на основе растительных масел // Хімічні Каразінські читання – 2016 (ХКЧ'16): тези VIII Всеукр. наук. конф., 18–20 квітня 2016 р. / Харківський національний ун-т ім. В. Н. Каразіна. Харків, 2016. С. 134.

445. Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В., Скуріхіна Л. А. Вплив жиру-магнетитової суспензії на функціонально-технологічні показники яловичого фаршу // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. до 85-річчя Таврійського державного агротехнологічного університету та 50-річчя Харківського державного університету харчування та торгівлі, 5–7 вересня 2017 р. / ТДАТУ, ХДУХТ. Харків, Мелітополь, Кирилівка, 2017. С. 247–248.

446. Цихановська І. В., Александров О. В., Гонтар Т. Б., Євлаш В. В. та ін. Удосконалення технології виробництва житнього хліба, збагаченого харчовою добавкою комплексної дії // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. до 85-річчя Таврійського державного агротехнологічного університету та 50-річчя Харківського державного університету харчування та торгівлі, 5–7 вересня 2017 р. / ТДАТУ, ХДУХТ. Харків, Мелітополь, Кирилівка, 2017. С. 245–246.

447. Цихановська І. В., Скуріхіна Л. А., Павлоцька Л. Ф. Дослідження впливу залізовмісної біологічно активної добавки на процеси перетравлюваності білків // Розвиток харчових виробництв ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: тези Міжнар. наук.-практ. конф., 18 травня 2017 р. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2017. С. 157–159.

448. Цихановська І. В., Александров О. В., Гонтар Т. Б., Павлоцька Л. Ф. Отримання та дослідження ліпідно-магнетитових суспензій // Розвиток харчових виробництв ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність: тези Міжнар. наук.-практ. конф., 18 травня 2017 р. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2017. С. 332–333.

449. Цихановська І. В., Александров О. В., Гонтар Т. Б., Павлоцька Л.Ф. Показники якості харчової добавки на основі магнетиту // Розвиток харчових виробництв ресторанного та готельного господарств і торгівлі:

проблеми, перспективи, ефективність: тези Міжнар. наук.-практ. конф., 18 травня 2017 р. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2017. С. 334–335.

450. Цихановська І. В., Скуріхіна Л. А., Павлоцька Л.Ф., Дмитрієвич Л. Р. Використання жиру-магнетитової суспензії для підвищення харчової цінності «Сухофрукти в шоколаді» // Технологии XXI. Прогрессивные технологии в пищевой промышленности века: тезисы 23 междунар. науч.-практ. конф., 11–16 сентября 2017 г. / Сумской филиал Харьк. нац. ун-та внутренних дел. Сумы, Одесса, 2017. Ч. 1. С. 51–52.

451. Цихановська І. В., Блонська Д. С., Чернуха Я. І., Євлаш В. В. та ін. Вплив харчової добавки «Магнетофуд» на показники якості вівсяного печива // Інноваційні технології розвитку у сфері харчових виробництв, готельно-ресторанного бізнесу, економіки та підприємства: наукові пошуки молоді: тези Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, 19 квітня 2018 р. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2018. С. 71.

452. Цихановська І. В., Юрченко Л. І., Приходько О. Ю. Технологія низькотемпературної обробки м'ясних напівфабрикатів на основі яловичого фаршу, модифікованого добавкою «Магнетофуд» // Холод в біології та медицині – 2018: тези 42-ї щорічної конф. молодих вчених, присвяченої 100-річчю з дня заснування Національної академії наук України, 23–24 травня 2018 р. / Національна академія наук України, Інститут проблем кріобіології і кріомедицини НАН України, кафедра UNESCO з кріобіології. Харків, 2018. С. 30.

453. Цихановська І. В., Євлаш В. В., Уразбаєва К. А. Формування технологічних властивостей желейних мас з використанням харчової добавки «Магнетофуд» // Підприємництво, торгівля: теоретичні підходи та практичні аспекти: матеріали I Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., 27–28 листопада 2018 р. / Полтавський ун-т екон. та торг. Полтава, 2018. С. 126–128.

454. Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В. Розробка технології житньо-пшеничного хліба «Харківський родничок» з додаванням поліфункціональної харчової добавки «Магнетофуд» // Інноваційні

технології у хлібопекарському виробництві: матеріали Міжнар. спец. наук.-практ. конф. / Національний ун-т харч. технол. Київ, 2018. С. 54–56.

455. Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В. Удосконалення технології вівсяного печива з додаванням харчової добавки «Магнетофуд» // Здобутки та перспективи розвитку кондитерської галузі: матеріали Міжнар. спец. наук.-практ. конф. / Національний ун-т харч. технол. Київ, 2018. С. 97–100.

456. Цихановська І. В., Александров О. В., Товма Л. Ф., Євлаш В. В. Сирний десерт, збагачений поліфункціональною харчовою добавкою «Магнетофуд» для покращення якості харчування військовослужбовців // Актуальні проблеми тилового забезпечення Національної гвардії України: тези Круглого столу Національної академії Національної гвардії України, 19 червня 2018 р. / Національна академія Нац. гвардії України. Харків, 2018. С. 5–13.

457. Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В., Скуріхіна Л. А. Розробка технології біфштекса «Козацький» з додаванням поліфункціональної харчової добавки «Магнетофуд» // Технології харчових продуктів і комбікормів: тези Міжнар. наук.-практ. конф., 24–29 вересня 2018 р. / Одеська нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2018. С. 48–50.

458. Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В. Розробка технології сирного десерту з додаванням поліфункціональної харчової добавки «Магнетофуд» // Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції: програма та тези VII Міжнар. наук.-техн. конф., 6–7 листопада 2018 р. / Національний ун-т харч. технол. Київ, 2018. С. 131–132.

459. Tsykhanovska I., Oleinik D., Alexandrov A. Substantiation of the mechanism of interaction between biopolymers of flour and the nanoparticles of the «Magnetofood» food additive // Book of Abstracts Conference of Young Scientists at East West Chemistry Conference, 10–11 October 2018 / Lviv Polytechnic National University. Lviv, 2018. P. 32–33.

460. ДСТУ 3946–2000. Система розроблення і поставлення продукції на виробництво. Продукція харчова. Основні положення. К.: Держспоживстандарт України, 2000. 26 с.

461. Державні санітарні норми та правила «Медичні вимоги до якості та безпечності харчових продуктів та продовольчої сировини»: затверджено наказом МОЗ України № 1140 від 29.12.2012 р. URL:

<http://zakon3.rynchenko.gov.ua/laws/show/z0088-13> (дата звернення 11.07.2018 р.).

462. Харчові добавки. Номенклатура та загальні вимоги: ДСТУ-НCODE. Харків: ХДУХТ, 2015. 111 с. STAN 192:2009/ [введ. 01.07.2015]. К.: Укрдержспоживстандарт України, 2009. 246 с.

463. МУК 4.2.1847-04 Санитарно-эпидемиологическая оценка обоснования сроков годности и условий хранения пищевых продуктов. Методологические указания. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 31с.

464. Сидняев Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учебн. пособие. Москва: Юрайт, 2011. 399 с.

465. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Svidlo K., Gontar T. Design of technology for the rye-wheat bread «Kharkivski rodnichok» with the addition of polyfunctional food additive «Magnetofood» // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. № 6/11 (90). P. 48–58.

466. Цихановська І. В., Скуріхіна Л. А., Александров О. В., Гонтар Т. Б. Дослідження впливу біологічно активної добавки на якість м'ясних посічених напівфабрикатів // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків: ХДУХТ, 2017. Вип. 1 (25), С. 302–313.

467. Белов К. П. Магнитные и кристаллохимические исследования ферритов. М.: Изд-во МГУ, 1971. 270 с.

468. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: Иностран. лит-ра, 1986. 778 с.

469. Voltaire E. R., Gluschenko N. N. Fiziko-chemical aspects of the application of magnetic fluids in experimental medicine // Proceedings of the IX International Conference on Plesskii magnetic fluids. Ivanovo: ISPU, 2000. P. 349–351.

470. Черкасова О. Г. Мелкодисперсный магнетит – магнитный наполнитель лекарственных средств (обзор) // Хим.-фарм. журнал. 1992. Т. 26, № 7/8. – С. 84–88.

471. Krishnan K. Biomedical nanomagnetism: a spin through possibilities in imaging, diagnostics, and therapy // IEEE Trans. Magnetic. 2010. Vol. 46, № 7. P. 2523–2558.

472. Saiyed Z., Telang S., Ramchand C. Application of magnetic techniques in the fields of drug discovery and biomedicine // Biomagn. Res. and Tech. 2003. Vol. 1. № 2. P. 1021–1030.

473. Илюха Н. Г., Цихановская И. В., Барсова З. В., Коваленко В. А. Технология производства и показатели качества пищевой добавки на основе магнетита // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. № 6/10 (48). С. 32–35.

474. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Svidlo K., Gontar T.. Influence of the polyfunctional food supplement «Magnetofood» on the quality of the wheat-rye bread «Kharkiv Rodnichok» in the storage process // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. № 5/11 (89). P. 61–70.

475. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Svidlo K., Gontar T., Yurchenko L., Pavlotska L. Substantiation of the mechanism of interaction between biopolymers of rye-and-wheat flour and the nanoparticles of the «Magnetofood» food additive in order to improve moisture-retaining capacity of Dough // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. № 2/11 (92). P. 70–80.

476. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Svidlo K., Gontar T. Research into technological indicators of a rye-wheat dough semi-finished product with the addition of the polyfunctional food supplement «Magnetofood» // Eureka: Life Sciences. 2017. Vol. 6 (12). № 6. P. 43–50.

477. Наумов Г. Б., Рыженко Б. Н., Ходаковский И. Л. Справочник термодинамических величин (для геологов). Москва: Атомиздат, 1971. 240 с.
478. Рябин В. А., Остроумов М. А., Свит Т. Ф. Термодинамические свойства веществ: справ. Ленинград: Химия, 1977. 392 с.
479. Ілюха М. Г., Барсова З. В., Тимофеева В. П., Цихановська І. В., Ведерникова І. О. Нанохімічна технологія магнетиту // Хімічна промисловість України. 2009. № 5(94). С. 37–41.
480. Дикий Н., Медведева Е., Федорец И., Хлапова Н., Луцай Н. Вісник Харківського університету, Серія фізична. Ядра. Частилки. Поля. 2009. Вип. 859, № 2/42. С. 89.
481. Ruby C., Aissa R., Gehin A., et al. Green rust synthesis by coprecipitation of FeII-FeIII ions and mass-balance diagrams // C. R. Geoscience. 2006. Vol. 338. № 6/7. P. 420–432.
482. Gehin A., Ruby Ch., Abdelmoula M., et al. Synthesis of Fe(II-III) hydroxysulphate Green rust by coprecipitation // Solid State Sci. 2002. Vol. 4. № 1. P. 61–66.
483. Лавриненко Е. Н. Fe(II)-Fe(III) – слойные двойные гидроксиды (Green rust) // Наноструктурное материаловедение. 2009. № 3. С. 15–40.
484. Hua C. C., Zakaria S., Farahiyah R., Khong L. T., Nguyen K. L., Abdullah M., Ahmad S. Sizecontrolled synthesis and characterization of Fe₃O₄ nanoparticles by chemical coprecipitation method // Sains. Malaysiana. 2008. № 37. P. 389–394.
485. Спосіб отримання магнетиту: пат. на кор. модель 54284 Україна: МПК (2009) C01G49/00 / Ілюха М. Г., Барсова З. В., Цихановська І. В., Тимофеева В. П., Ведерникова І. О.; заявник та власник УПА. № u201002474; заявл. 05.03.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21. 6 с.
486. Харчова добавка «Магнетофуд»: пат. на кор. модель 126502 Україна: МПК (2016.01) A23L 13/40, A23L 33/10 / Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В., Гонтар Т. Б., Лазарева Т. А.; патентовласник УПА. № u201800133; заявл. 03.01.2018; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12. 4 с.

487. Спосіб одержання харчової добавки «Магнетофуд»: пат. на кор. модель 126507 Україна: МПК (2018.01) B82Y 40/00, B82B 1/00, B82B 3/00 / Цихановська І. В., Александров О. В., Євлаш В. В., Гонтар Т. Б., Лазарева Т. А.; патентовласник УПА. № u201800138; заявл. 03.01.2018; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12. 4 с.

488. Haneda K., Morrish A. Structural peculiarities in magnetic small particles // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 1993. Vol. 76, № 1. P. 132–137.

489. Dutz S., Hergt R. Hysteresis losses of magnetic nanoparticle powders in the single domain size range // J. Magn. Magn. Matter. 2007. Vol. 4. № 308. P. 305–312.

490. Mozaffari M., Behdadfara B., Amighiana J. Preparation and characterization of manganese ferrite nanoparticles via co-precipitation method for hyperthermia // Iranian J. Pharm. Sci. 2008. Vol. 4. № 2. P. 115–118.

491. Lin C., Lee C., Chiu W., et al. Preparation and properties of poly (acrylic acid) oligomer stabilized superparamagnetic ferrofluid // J. Colloid. Interface Sci. 2005. Vol. 291. № 1. P. 411–420.

492. Chang H., Tsai K., Tsung T. A study on dynamic stability of the Fe₃O₄ magnetorheological fluid // Mater. Sci. Forum. 2007. Vol. 561. № 1. P. 2175–2178.

493. Кандаурова Н. В. Приповерхностные и межфазные явления в магнитной жидкости в электрическом и магнитном полях и их техническое применение: автореф. дис. ... доктора. техн. наук: 02.00.04. Ставрополь, 2000. 38 с.

494. Скорохода Т. В. Дослідження агрегаційної та седиментаційної стійкості частинок γ -Fe₂O₃, модифікованих телехелевим коолігомером вінілацетату та малеїнового ангідриду у водних розчинах // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2008. № 609. С. 352–355.

495. Цихановська І. В., Демидов І. М., Барсова З. В., Павлоцька Л. Ф. Дослідження процесів окиснювальних та термічних перетворень в системі: олія-ліпід-магнетитова суспензія // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків: ХДУХТ, 2015. Вип. 1 (21), С. 353–362.

496. Alexandrov A., Tsykhanovska I., Evlash V., Lazareva T., Svidlo K., Gontar T. Formation of the quality of the rzhno-wheat bread with addition of the polyfunktianial food additives «Magnetofood» // *New Technologies of Food Production: Raw Materials, Additives, Quality: collective monograph*. Beau-Bassin: LAP LAMBERT. Academic Publishing, 2018. P. 243–297.

497. Максимов А. С., Черных В. Я. Лабораторный практикум по реологии сырья, полуфабрикатов и готовых изделий хлебопекарного, макаронного и кондитерского производств. М.: Издат. комплекс МГУПП, 2004. 162 с.

498. Цихановська І. В., Демидов І. М., Александров О. В., Гонтар Т. Б., Павлоцька Л. Ф. Дослідження впливу біологічно активної добавки на процеси окиснення ліпідів // *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. праць / Харк. держ. ун-т харч. та торг.* Харків: ХДУХТ, 2017. Вип. 2 (26). С. 251–262.

499. ГН 4.4.8.073-2001 Тимчасові гігієнічні нормативи вмісту контамінантів хімічної і біологічної природи у біологічно активних добавках: наказ МОЗ № 73 від 2001.

500. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Bryzytska O. Substantiation of the interaction between the lipo- and glucoproteids of rye-wheat flour and nanoparticles of the food additive «Magnetofood» // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 4/11 (94). P. 61–68.

501. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Yevlash T.. Substantiation of the mechanism of interaction of between the carbohydrates of rye-wheat flour and nanoparticles of the polyfunctional food additive «Magnetofood» // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 3 /11 (93). P. 59–68.

502. Tsykhanovska I. Formation of functional and technological properties of flour dough and quality of finished products in the technology of custard gingerbread with the use of «Magnetofood» food additive // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2019. № 3/3 (47). С. 26–32.

503. Tsykhanovska I. The formation of functional and technological properties of the dough and quality indicators of oatmeal cookies with the use of «Magnetofood» food additive // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2019. № 4/3 (48). С. 26–30.

504. Tsykhanovska I., Skurikhina L., Evlash V., Pavlotska L. Influence of food additive «Magnetofood» on physical and chemical parameters, functional properties of model minced meat systems // *Food Science and Technology*. 2019. Vol. 13. Issue 2. P. 87–96.

505. Mahdavi M., Ahmad M. B., Haron M. J., Namvar F., Nadi B., Ab Rahman M. Z., Amin J. Synthesis, Surface Modification and Characterisation of Biocompatible Magnetic Iron Oxide Nanoparticles for Biomedical Applications // *Molecules*. 2013. № 18. P. 7533–7548.

506. Ling Zhang, Rong He, Hong-Chen Gu. Oleic acid coating on the monodisperse magnetite nanoparticles // *Applied Surface Science*. APSUSC-14301. 2006. № 7. P. 1–7.

507. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Svidlo K., Gontar T. Research quality of the wheat-rye bread with addition of the polyfunctional food supplement «Magnetofood» // *Eureka: Life Sciences*. 2017. Vol. 5 (11). № 5. P. 45–52.

508. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Yevlash T. Investigation of the water-retaining capacity of the carbohydrate complex of rye-wheat dough with addition of polyfunctional food supplement «Magnetofood» // *Eureka: Life Sciences*. 2018. Vol. 3 (15). № 3. P. 56–64.

509. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Bryzytska O. Investigation of the water-retaining capacity of the carbohydrate complex of rye-wheat dough with addition of polyfunctional food supplement «Magnetofood» // *Eureka: Life Sciences*. 2018. Vol. 4 (16). № 4. P. 63–68.

510. Демидов І. М., Григорова А. В. Вплив ступеня ненасиченості олій на склад вторинних продуктів їх окиснення *Технічні науки: стан, досягнення і*

перспективи розвитку м'ясної, оліє-жирової та молочної галузей: тез. доп. Міжнар. наук.-техн. конф., 22–23 березня 2012 р. Київ, 2012. С. 42–43.

511. Лисицын А. Н., Алымова Т. Б., Прохорова Л. Т. Некоторые факторы, определяющие стабильность растительных масел к окислению // Масложировая промышленность. 2005. № 3. С. 11–15.

512. Шильман Л. З., Сімакова І. В. та ін. Жири у виробництві харчової продукції: монографія. Суми: Університетська книга, 2016. 278 с.

513. Александров О. В., Цихановська І. В., Гонтар Т. Б., Павлоцька Л. Ф. Исследование влияния биологически активной добавки на процессы окисления растительных масел // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: сб. статей III Междунар. науч.-практ. конф. 23–24 марта 2017 г. / БГАТУ. Минск, 2017. С. 170–173.

514. Tsykhanovska I., Skurikhina, Evlash V., Pavlotska L. Formation of the functional and technological properties of the beef minced meat by using the food ad-ditive on the nanopowder basis of double oxide of two- and trivalent iron // Ukrainian Food Journal. 2018. Vol. 7. № 3. P. 379–396.

515. Yurchenko L., Tsykhanovska I., Prikhodko E. Technique of low temperature processing of ground beef meat semi-finished products, modified with food supplement «Magnetofood».

516. Цихановська І. В., Євлаш В. В., Скуріхіна Л. А., Павлоцька Л. Ф. Удосконалення технології біфштексів з яловичини з використанням харчової добавки «Магнетофуд» // Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Технічні науки / ПУЕТ. Полтава, 2018. № 1 (85). С. 39–50.

517. Нагорнов С. А. Техника и технологии производства и переработки растительных масел: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2010. 96 с.

518. Тютюнников Б. Н. Химия жиров. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1992. 448 с.

519. Drmota A., Kosak A., Znidarsik A. A mechanism for the adsorption of carboxylic acids onto the surface of magnetic nanoparticles // Materials and technology. Ljubljana, Slovenia, 2008. № 42. P. 79–83.

520. Wu J., Ma G. H. Recent Studies of Pickering Emulsions: Particles Make the Difference // *Small*. 2016. № 12. P. 4633–4648.

521. Destribats M., Gineste S., Laurichesse E., Tanner H., Leal-Calderon F., et al. Pickering emulsions: what are the main parameters determining the emulsion type and interfacial properties? // *Langmuir*. 2014. № 30. P. 9313–9326. [Crossref].

522. Vengsarkar P. S. Synthesis and Gas-Expanded Liquid (GXL) Processing of Metal and Metal Oxide Nanoparticles: Fundamentals and Application: PhD diss. Auburn University, 2016.

523. Tsykhanovska I., Yevlash V., Khamitova B., Urazbaieva K., Aleksandrov O., Kaida N. Influence of the «Magnetofood» food supplement on the structural and mechanical properties of molded fruit jelly with various structure-forming agents // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Нові рішення в сучасних технологіях / НТУ «ХПІ». Харків, 2019. № 5 (1330). С. 175–186.*

524. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Yevlash T. Investigation of the water-retaining capacity of the carbohydrate complex of rye-wheat dough with addition of polyfunctional food supplement «Magnetofood» // *Eureka: Life Sciences*. 2018. Vol. 3 (15). № 3. P. 56–64.

525. Драгилев А. И., Лурье А. И. Технология кондитерских изделий. Москва: ДеЛи-принт, 2001. 483 с.

526. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Khamitova B., Svidlo K., Nechuiviter O. Improving the technique of scrambled desserts using the food supplement «Magnetofood» // *Eureka: Life Sciences*. 2019. Vol. 2 (20). № 2. P. 40–48.

527. Tsykhanovska I. Development of molded jelly marmelad technology with the introduction of food additive «Magnetofood» // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Нові рішення в сучасних технологіях / НТУ «ХПІ». Харків, 2019. № 10 (1335). С. 109–119.*

528. Александров О. В., Цихановська І. В., Кайда Н. С., Євлаш В. В. Розробка рецептури сиркового десерту «Слоненя» з використанням харчової добавки «Магнетофуд» // Наукові праці Національного університету харчових технологій / НУХТ. Київ, 2019. Т. 25. № 1. С. 169–179.

529. Цихановська І. В., Євлаш В. В., Александров О. В., Кайда Н. С., Коваленко З. І. Удосконалення технології зефіру біло-рожевого з використанням харчової добавки «Магнетофуд» // Наукові праці Національного університету харчових технологій / НУХТ. Київ, 2019. Т. 25. № 2. С. 186–203.

530. Tsykhanovska I., Evlash V., Alexandrov A., Lazareva T., Bryzytska O. Investigation of the water-retaining capacity of the carbohydrate complex of rye-wheat dough with addition of polyfunctional food supplement «Magnetofood» // Eureka: Life Sciences. 2018. Vol. 4 (16). № 4. P. 63–68.

531. Цихановська І. В. Удосконалення технології вівсяного печива шляхом введення до рецептури харчової добавки «Магнетофуд» на основі дво- та тривалентного заліза // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Харків, 2019. Вип. 1 (29). С. 43–56.

532. Ершов П. С. Сборник рецептур на хлеб и хлебобулочные изделия. Санкт-Петербург: Профи-информ, 2004. 190 с.

533. Павлов А. В. Сборник рецептур мучных кондитерских и булочных изделий для предприятий общественного питания. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1998. 450 с.

534. Здобнов А. И., Цыганенко В. А. Сборник рецептур блюд и кулинарных изделий: для предприятий обществ. питания. Киев: Ария, Москва: Лада, 2009. 680 с.

535. Иванушко Л. С. Рецептуры на мармелад, пастилу и зефир. Москва: Пищевая пром-сть. 1974. 208 с.