

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



**ОЛШЕВСЬКИЙ ВАЛЕНТИН ВІКТОРОВИЧ**

УДК 664.1.03:664.64:(637.344+544.023.55)

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ЗАСАДИ ЗАСТОСУВАННЯ  
НАНОМАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ МАСООБМІННИХ  
ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних  
виробництв

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

**Київ – 2021**

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному університеті харчових технологій Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант :** доктор технічних наук, професор

**Українець Анатолій Іванович,**

Національний університет харчових технологій МОН України, ректор

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор

**Дячок Василь Володимирович,**

Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, професор кафедри прикладної екології та збалансованого природокористування

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**Дубовкіна Ірина Олександрівна,**

Інститут технічної теплофізики НАН України, старший науковий співробітник відділу тепломасообміну в дисперсних системах

доктор технічних наук, професор

**Паламарчук Ігор Павлович,**

Національний університет біоресурсів і природокористування України МОН України, професор кафедри процесів і обладнання переробки продукції АПК

Захист дисертації відбудеться *14 квітня 2021 року о 14:00* на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.058.02 у Національному університеті харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68, аудиторія А - 311.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розіслано *12 березня 2021 року.*

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук, доцент



С. І. Літвинчук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Сучасні тенденції розвитку харчової індустрії вимагають застосування інноваційних досягнень науки і техніки у виробництві харчових продуктів із використанням нових фізико-хімічних способів інтенсифікації процесів їх отримання. Переробка харчової сировини супроводжується впливом ряду технологічних чинників (подрібнення, змішування, екстрагування, диспергування тощо) на їхні структурно-механічні та технологічні властивості. Явища та закономірності формування різних структур в ультра- та мікрогетерогенних системах детально вивчено П.А.Ребіндером, Б.В.Дерягіним, А.В.Ликовим, Є.Д.Щукіним, С.С.Воюцьким, А.В.Думанським, М.Б.Ур'євим та ін. Зміст опублікованих наукових досліджень, які присвячені фундаментальним і практичним аспектам фізико-хімічних явищ у дисперсних системах, свідчать про велику зацікавленість дослідників до питань структуроутворення та стабільності багатокомпонентних гетерогенних дисперсних систем та вивчення їхніх властивостей. Проведені дослідження базуються на загальноприйнятих теоретичних моделях, що описують фізичні явища дисперсних систем, та систематично розвиваються й доповнюються. Результати теоретичних розробок одержують практичне уточнення та підтвердження за рахунок наявного найсучаснішого технологічного та інструментального забезпечення.

Враховуючи той факт, що більшість харчових продуктів виробляють у вигляді багатокомпонентних систем (порошки, кристали, емульсії, гелі), значна кількість важливих аспектів структуроутворення та стабільності цих харчових дисперсій достатньо не досліджено. Також є певний недолік в технологіях та обладнанні, які б дозволили інтенсифікувати ряд основних технологічних операцій і процесів структуроутворення з використанням ультрананодисперсних систем із новими молекулярно-кінетичними та електроповерхневими властивостями.

Оскільки швидкості гетерогенних хіміко-технологічних процесів пропорційні активній поверхні взаємодії фаз, дисперсність твердої фази – один із основних критеріїв, що визначає умови проведення цих процесів, а підвищення дисперсності – один із основних шляхів їхньої інтенсифікації. Тому вивчення механізму дії нанодисперсних систем в елементарних контактних взаємодіях між частинками дисперсних фаз у дисперсійних середовищах різної полярності, їхнього впливу на макрореологічні характеристики структурованих дисперсних систем є актуальним і має науковий і практичний інтерес, а використання вищезазначених процесів дасть можливість на якісно новому рівні інтенсифікувати масообмінні процеси харчових виробництв та створити комплексні енерго- та ресурсощадні технології переробки харчової сировини та виробництва харчових продуктів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконували в рамках науково-дослідних робіт Проблемної науково-дослідної лабораторії Національного університету харчових технологій відповідно до науково-технічних програм Міністерства освіти і науки України: «Дослідження фізико-хімічних і біологічних механізмів впливу наночастинок металів з метою корекції контамінації харчових продуктів» (номер державної реєстрації 0108U011258, 2009-2011 рр., відповідальний виконавець); «Дослідження комбінованого впливу електророзрядних технологій на зміни контамінуючої

мікрофлори рідких харчових продуктів» (номер державної реєстрації 0111U001049, 2012-2013 рр., науковий керівник); «Методи цілеспрямованої зміни властивостей харчових продуктів з використанням нанокмпозитів» (номер державної реєстрації 0113U003127, 2013-2014 рр., відповідальний виконавець); «Наукові засади розроблення інноваційних технологій хлібобулочних виробів підвищеної харчової цінності та термінів їх зберігання» (номер державної реєстрації 0116U001529, 2016-2018 рр., відповідальний виконавець); в рамках проведення науково-дослідної та технологічної роботи науково-дослідної частини Національного університету харчових технологій «Розробка ресурсощадних технологій одержання харчових продуктів з використанням гетерогенних дисперсних систем», номер державної реєстрації 0118U001244, 2018-2020 рр., науковий керівник).

**Метою дисертаційної роботи** є наукове обґрунтування інтенсифікації масообмінних процесів харчових виробництв із застосуванням наночастинок і нанокмпозитів із структуро- та агрегатоутворюючими властивостями.

**Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:**

- обґрунтувати доцільність отримання наночастинок полівалентних і біогенних металів із комплексоутворюючими властивостями та їхнього використання для інтенсифікації процесів структуро- та агрегатоутворення;

- на основі аналізу математичних моделей кінетики агрегації в багатофазних дисперсних системах провести математичне моделювання «швидкої коагуляції» в даних системах, залежно від молекулярно-кінетичних та електроповерхневих властивостей наночастинок;

- розробити способи та експериментальні установки для одержання наночастинок із структуроутворюючими та комплексоутворюючими властивостями та дослідження їхнього впливу на масообмін у гетерогенних харчових системах;

- визначити вплив технологій отримання наночастинок на їхні молекулярно-кінетичні та електроповерхневі властивості, дослідити фізико-хімічні та біологічні властивості одержаних нанорозмірних частинок;

- провести експериментальні дослідження та визначити кінетичні закономірності впливу наночастинок на їхню комплексо- та агрегатоутворюючу здатність у технологічних системах харчових виробництв, залежно від фізико-хімічних та електроповерхневих властивостей дисперсної фази, а саме - розмірності та концентрації, величини та знака заряду, електрокінетичного потенціалу;

- розробити енергоефективну промислову технологію виробництва наночастинок металів відповідно до сучасного стану розвитку технологій і способів одержання;

- провести апробацію ефективності роботи розробленого обладнання та технології одержання наночастинок і нанокмпозитів із структуро- та агрегатоутворюючими властивостями у різних галузях харчової промисловості.

*Об'єкт дослідження* - масообмінні процеси харчових виробництв при застосуванні наночастинок і нанокмпозитів із структуро- та агрегатоутворюючими властивостями.

*Предмет дослідження* – параметри масообмінних процесів при структуро- та агрегатоутворенні в харчових гетерогенних системах із застосуванням наночастинок і нанокмпозитів.

**Методи дослідження** – комплексні дослідження із застосуванням фізичного і математичного моделювання масообмінних процесів із застосуванням наночастинок і наноконструкцій. В основу математичного моделювання покладено кінетику агрегації в багатофазних дисперсних системах, заснованих на модифікаціях методу динаміки частинок із урахуванням сил Ван-дер-Ваальса, гравітації, Броунівських і Стоксових сил, енергії Гіббса. Фізичне моделювання проводили в лабораторних і виробничих умовах із використанням сучасних електронних вимірювальних пристроїв і промислових приладів, стандартизованих і спеціальних фізико-хімічних методів вимірювань та аналізу їх результатів з використанням математичних методів планування експериментів і пакетів програм на базі сучасних інтегрованих систем Microsoft Office 2010, Mathcad 15, Autocad 19, Matlab R 2011b, Origin 8.6 та ін.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У результаті виконаних теоретичних та експериментальних досліджень отримано нові наукові результати:

Вперше:

- виконано математичне моделювання впливу наночастинок на міжфазові взаємодії в гетерогенних дисперсних системах, що дало можливість дослідити динаміку одночасного турбулентного та броунівського масоперенесення на процес «швидкої коагуляції» частинок і запропонувати механізм впливу наночастинок на їхню агрегатоутворюючу здатність;

- на основі результатів математичного моделювання кінетики агрегації частинок у багатофазних дисперсних системах визначено оптимальні діапазони параметрів (розмірність, електрокінетичний потенціал, концентрація частинок), за яких у технологічних системах харчових виробництв відбуваються процеси структуро- та агрегатоутворення;

- обґрунтовано застосування наночастинок полівалентних і біогенних металів *Al*, *Mg*, *Mn*, одержаних диспергаційно-конденсаційними методами, для інтенсифікації процесів структуро- та агрегатоутворення в харчових гетерогенних системах;

- встановлено фактори безпеки застосування наночастинок полівалентних і біогенних металів *Al*, *Mg*, *Mn*, отриманих електроіскровим способом у харчових виробництвах;

- обґрунтовано раціональні параметри процесів екстрагування, очищення та мікронутрієнтно збагачення залежно від молекулярно-кінетичних та електроповерхневих властивостей наночастинок, одержаних електроіскровим способом у харчових виробництвах;

Набули подальшого розвитку:

- закономірності формування нанорозмірної дисперсної фази біогенних і полівалентних металів *Al*, *Mg*, *Mn*, *Ag* у процесі підводного електроіскрового розряду з помірно-стабільною кінетичною та агрегативною стійкістю;

- розвинуто методи математичного аналізу процесу «швидкої коагуляції» частинок у багатофазних дисперсних системах;

- нові підходи до керування інтенсивністю процесів агрегато- та структуроутворення в апаратах змішувального типу на основі моделі турбулентного вихорового руху наночастинок.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практична цінність і реалізація результатів роботи полягає в наступному:

- розвинуто методи математичного аналізу процесу «швидкої коагуляції» частинок в багатофазних дисперсних системах;
- розроблена модель дисипації кінетичної енергії в багатофазних дисперсних системах дає можливість визначити дисперсність частинок, за яких у механізмі коагуляції переважає броунівська дифузія частинок та вплив інтенсивності процесу перемішування на каскадне перенесення кінетичної енергії турбулентності;
- визначено оптимальні діапазони параметрів дисперсних частинок (розмірність, електрокінетичний потенціал, концентрація), які сприяють інтенсифікації процесів коагуляції в апаратах змішувального типу та визначено технології їхнього синтезу;
- оптимізовано основні фізико-технологічні параметри розрядного контуру підводного електроіскрового розряду для одержання наночастинок полівалентних і біогенних металів *Al*, *Mg*, *Mn* та *Ag*;
- обґрунтовано шляхи підвищення харчової цінності та формування якісних показників харчових продуктів лікувально-профілактичного призначення, мікронутрієнтно збагачених наночастинами біогенних і полівалентних металів та нанокмпозитними преміксами.

Результати досліджень використано під час:

- розробки енергоефективної промислової електроіскрової технології виробництва наночастинок металів із структуро- та агрегатоутворюючими властивостями;
- розробки енерго- та ресурсощадних технологій переробки харчової сировини та виробництва харчових продуктів із використанням наночастинок і нанокмпозитів.

Отримані результати досліджень використано на цукрових заводах України під час впровадження дифузійно-пресового екстрагування сахарози з бурякової стружки із застосуванням наночастинок алюмінію, отриманих електроіскровим способом (ТОВ «Юкрейніан Шугар Компані», ТОВ «Наркевицький цукровий завод», ТДВ «Новоіванівський цукровий завод»; на АТ «Пирятинський сирзавод» для апробації технології виробництва сухої молочної сироватки, збагаченої наночастинами біогенних металів *Mg* та *Mn*, отриманих електроіскровим способом; на ПП «Мільвілль» для апробації технології виробництва хлібобулочних виробів з використанням нанокмпозитного преміксу «Наномікроєнт» та наночастинами біогенних металів *Mg* та *Mn*, отриманих електроіскровим способом.

Раціональні параметри процесу електроіскрового диспергування наночастинок металу *Al* використано в нормативних документах ТУ У 20.1-2799900706-001:2020 коагулянт «Алюкол» (алюміній колоїдний), висновку санітарно-епідеміологічної експертизи за № 12.2-18-1/24882 державної служби України з питань безпечності харчових продуктів та захисту споживачів на застосування коагулянту «Алюкол», під час розробки «Способу екстрагування сахарози з бурякової стружки» (Пат.

114866), «Способу очищення дифузійного соку» (Пат.104338), «Пристрою для отримання колоїду металу» (Пат. на корисну модель 113262).

Сумарний прогнозований економічний ефект від впровадження результатів роботи становив 2572,931 тис. грн. Результати роботи впроваджено у навчальний процес у підготовці фахівців спеціальності «Галузеве машинобудування» під час вивчення дисциплін «Інноваційне обладнання галузі», «Проектування обладнання галузі», «Моделювання технологічних систем», виконання науково-дослідних робіт, в курсовому та дипломному проектуванні.

**Особистий внесок здобувача** полягає в аналізі стану проблеми, обґрунтуванні напряму та програми досліджень, обґрунтуванні та розробці основних ідей дисертації, у постановці та вирішенні завдань теоретичного, експериментального та прикладного характеру, підготовці заявки на видачу патенту на корисну модель і на винахід, здійсненні заходів щодо впровадження отриманих результатів. За безпосередньою участю автора виготовлено дослідну установку, проведено експериментальні дослідження, здійснено оброблення та узагальнення результатів, розроблено промислову технологію виробництва наночастинок із заданими властивостями, її апробація та впровадження. Дисертаційна робота містить результати досліджень, проведених під час виконання науково-дослідних робіт з тематичними планами установи, що підтверджується робочими програмами та звітами про виконання НДР.

Результати роботи та експериментальні дослідження останніх років впроваджено в процесі керування науковими роботами магістрантів і аспірантів та у співробітництві за науковими напрямами з д-ром техн. наук К.Г. Лопатьком, канд. техн. наук А.І. Мариніним, канд. техн. наук Є.М. Бабком, Т.В. Никитюком, за безпосередньої участі автора та у співпраці з д-рами техн. наук В.Г. Мирончуком та С.М. Василенком, з д-ром хім. наук О.П. Перепелицею.

Конкретний особистий внесок здобувача в опублікованих за темою дисертації наукових працях наведено у списку праць. Автору належить основні ідеї опублікованих у співавторстві матеріалів. Результати досліджень обговорено та проаналізовано з науковим консультантом **проф. А.І. Українцем.**

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення та результати наукових досліджень повідомлено, обговорено та схвалено на: наукових семінарах кафедри технологічного обладнання та комп'ютерних технологій проектування НУХТ; I-ой Международной научно-практической конференции «Идентификация фальсифицированных пищевых продуктов. Контроль содержания и безопасности наночастиц в продукции сельского хозяйства и пищевых продуктах» (Москва, 2009); научном-техническом коллоквиуме молодых ученых и специалистов «Инновационный форум пищевых технологий, посвященный юбилею МГУПП: применение нанотехнологий и наноматериалов в пищевой промышленности» (Москва, 2010); 77-й науковій конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (Київ, 2011); VIII-ой Международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании» (Варна, 2012); Міжнародній науково-практичній конференції «Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості» (Київ, 2012); 78-й науковій конференції молодих



учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (Київ, 2012); Міжнародній науково-технічній конференції «Технічні науки: стан, досягнення і перспективи розвитку м'ясної, олієжирової та молочної галузей виробництва», (Київ, 2012); Міжнародній студентській науково-практичній конференції «Науково-технічна творчість студентів з процесів і обладнання харчових виробництв» (Донецьк, 2012); конференції студентів, аспірантів і молодих учених «Пищевые инновации и технологии» (Кемерово, 2013); I-ой Международной научно-практической конференции «Химия, био- и нанотехнологии, экология и экономика в пищевой и косметической промышленности» (Харьков, 2013); I-st «Food science, engineering and technologies 2013» (Plovdiv, 2013); IV-й Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених, аспірантів та студентів «Вода в харчовій промисловості» (Одеса, 2013); II-й Міжнародній науково-технічній конференції «Технічні науки: стан, досягнення і перспективи розвитку м'ясної, олієжирової та молочної галузей» (Київ, 2013); II-му північно та східно-європейському конгресу з харчової науки «The second north and east european congress on food» (Київ, 2013); I-ой Международной научно-практической конференции «Химия, био- и нанотехнологии, экология и экономика в пищевой и косметической промышленности» (Харьков, 2014); «Foodscience, engineering and technologies 2014» (Plovdiv, 2014); 34-th International Conference vacuum microbalance and thermoanalytical techniques and International conference of modern problems of surface chemistry (Kyiv, 2014); III-й Міжнародній науково-технічній конференції «Технічні науки: стан, досягнення і перспективи розвитку м'ясної, олієжирової та молочної галузей» (Київ, 2014); Міжнародній науковій конференції присвяченій 130-річчю НУХТ «Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти харчової промисловості» (Київ, 2014); International scientific-practical conference «Innovative technologies for production of functional foods» (Kutaisi, 2015); IV-й Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи розвитку м'ясної, молочної та олієжирової галузей у контексті євроінтеграції» (Київ, 2015); Всеукраїнській конференції з міжнародною участю, присвяченій 85-річчю з дня народження акад. НАН України О.О. Чуйка «Хімія, фізика та технологія поверхні» та семінарі «Наноструктуровані біосумісні/біоактивні матеріали» (Київ, 2015); Міжнародній науково-практичній конференції «Харчові технології, хлібопродукти і комбікорми» (Одеса, 2015); II-d Ukrainian-Polish scientific conference «Membrane and Sorption processes and technologies» (Kyiv, 2015); 8-th Central European Congress on Food 2016 – Food Science for Well-being (Kiev, 2016); Міжнародній науково-практичній конференції «Харчові технології, хлібопродукти і комбікорми» (Одеса, 2016); Міжнародній науково-практичній конференції «Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості» (Київ, 2016); Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку цукрової промисловості України» (Київ, 2017, 2018, 2019); Міжнародній науково-практичній конференції «Новітні науково-технічні рішення в цукровій промисловості» (Львів, 2017); Міжнародній науково-технічній конференції «Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції» (Київ, 2017); 84-й Міжнародній науковій конференції молодих учених, аспірантів і студентів



«Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (Київ, 2018); 8-й Міжнародній науково-технічній конференції «Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті євроінтеграції» (Київ, 2019), 86-й Міжнародній науковій конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (Київ, 2020).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 72 наукові праці, у тому числі: 39 статей, з них: 6 - у наукометричній базі SCOPUS, 1 - у наукометричній базі Web of Science, 11 – у закордонних наукових виданнях, 21 – у наукових фахових виданнях України, 27 тез доповідей та матеріалів конференцій, 3 патенти України на винахід та 3 – на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із анотації, списку публікацій за темою дисертації, змісту, перелік умовних позначень. вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел (325 найменувань), 7 додатків (на 162 сторінках), містить 39 таблиць та 93 рисунки. Основний текст роботи викладено на 265 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 499 сторінок.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано вибір теми дисертаційної роботи та її актуальність, сформульовано мету, завдання, наукові та практичні результати досліджень, визначено особистий внесок здобувача.

**У першому розділі** «Аналітичний огляд використання нанотехнологій» на підставі аналізу науково-технічної інформації окреслено основні напрями підвищення шляхів інтенсифікації масообмінних процесів харчових виробництв із застосуванням наноматеріалів, розглянуто механізми впливу наночастинок на їхню агрегато- та комплексоутворюючу здатність у гетерогенних дисперсних системах. Відмічено, що сучасний рівень апаратурно-технологічного забезпечення дає можливість одержати нанодисперсні системи з новими властивостями, функціональними та експлуатційними характеристиками. Визначено найбільш перспективні способи одержання наночастинок із врахуванням їхнього гранулометричного розподілення, енергетичного стану та механізму структуроутворювальної дії.

На основі узагальнення інформації встановлено, що дисперсність твердої фази частинок – один із основних критеріїв, який визначає умови проведення процесів структуро- та агрегатоутворення в багатокомпонентних гетерогенних дисперсних системах, а підвищення дисперсності – один із основних шляхів їхньої інтенсифікації. Обґрунтовано, що більшість досліджень з одержання ультра- та нанодисперсних систем мають несистемний характер, відсутні науково-технічні засади їх використання для інтенсифікації процесів екстрагування, очищення, рафінації та мікронутрієнтного збагачення харчової сировини та продуктів, а також методика аналізу та розрахунку процесів, що відбуваються в цих системах. На основі проведеного аналізу сформульовано завдання досліджень і обрано методологію їхнього вирішення.

**У другому розділі** «Вибір напряму досліджень, експериментальні установки, загальна методика та методи досліджень» наведено програму досліджень, яка

ілюструє взаємозв'язок і послідовність етапів роботи. Визначено методики та методи аналізу харчових продуктів (напівпродукти бурякоцукрового виробництва, хлібобулочні вироби, демінералізована сироватка молочна підсирна, нерафінована соєва олія) та нанорозмірних дисперсних систем, що використовувалися під час досліджень. Експериментальну частину роботи виконували з використанням лабораторних установок в умовах ПНДЛ НУХТ для екстрагування сахарози, дослідження структурно-механічних характеристик бурякової тканини; в умовах кафедри ТКММ НУБІП та відділу ПТНМ ІЕЗ ім.Є.О. Патона НАН України - одержання наноматеріалів; в умовах експериментального цеху ІПР НААН України - сушіння молочної сироватки; в умовах лабораторії санітарної мікробіології ДУ «Інституту гігієни та медичної екології ім. О.М. Марзеєва» НАМН України та промислової токсикології і гігієни праці при використанні хімічних речовин Інституту медицини праці АМН України - біологічні та мікробіологічні дослідження наноматеріалів. Загальні дослідження проводилися у виробничих хіміко-технологічній лабораторіях ТОВ «Юкрейніан Шугар Компані» (Засільський цукровий завод), ВП «Наркевицький цукровий завод», АТ «Пирятинський сирзавод», ПП «Міллвільль». Проведено узгодження основних електрофізичних параметрів розрядного контуру та електроіскрової камери лабораторної електророзрядної установки (рис. 1). Детальний опис будови, принципу дії експериментальних установок, методик і методів досліджень дає можливість відтворити будь-який експеримент.

**Третій розділ** «Математичне моделювання процесів агрегато- та структуроутворення в нанодисперсних системах» присвячений моделюванню впливу наночастинок на процеси агрегато- та структуроутворення в гетерогенних дисперсних системах.

Для визначення ймовірності зіткнення двох частинок застосовували підхід, подібний до молекулярної дифузії. Розглянуто дисперсне середовище, що містить в одиниці об'єму  $N_0$  сферичних частинок однакового розміру ( $N_0$  є таким, що виключається кількість зіткнень більше 2-х частинок), рідина, за визначенням, нерухома.

Одна з частинок із діаметром  $a$  (тестова) прийнята за нерухому. Якщо навколо цієї частинки виділити сферу з радіусом  $R$  таку, що ( $a/2 < R \ll H$ ), де  $H$  – відстань між центрами найближчих частинок, то можна допустити, що кожна інша частинка, що перетинає поверхню цієї сфери, захоплюється тестовою частинкою.

Відповідно, на поверхні сфери радіусом  $R$  концентрація частинок буде рівною нулю, і внаслідок цього, виникає градієнт концентрації частинок. Тоді броунівський потік частинок до сфери радіусом  $R$  опишеться подібно до рівняння молекулярної дифузії (дифузійним рівнянням):

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial n}{\partial t} \right), \quad (1)$$

де  $r$  – сферична координата з центром у центрі тестової частинки;  $D$  - коефіцієнт «броунівської» дифузії частинок до поверхні сфери радіусом  $R$ .

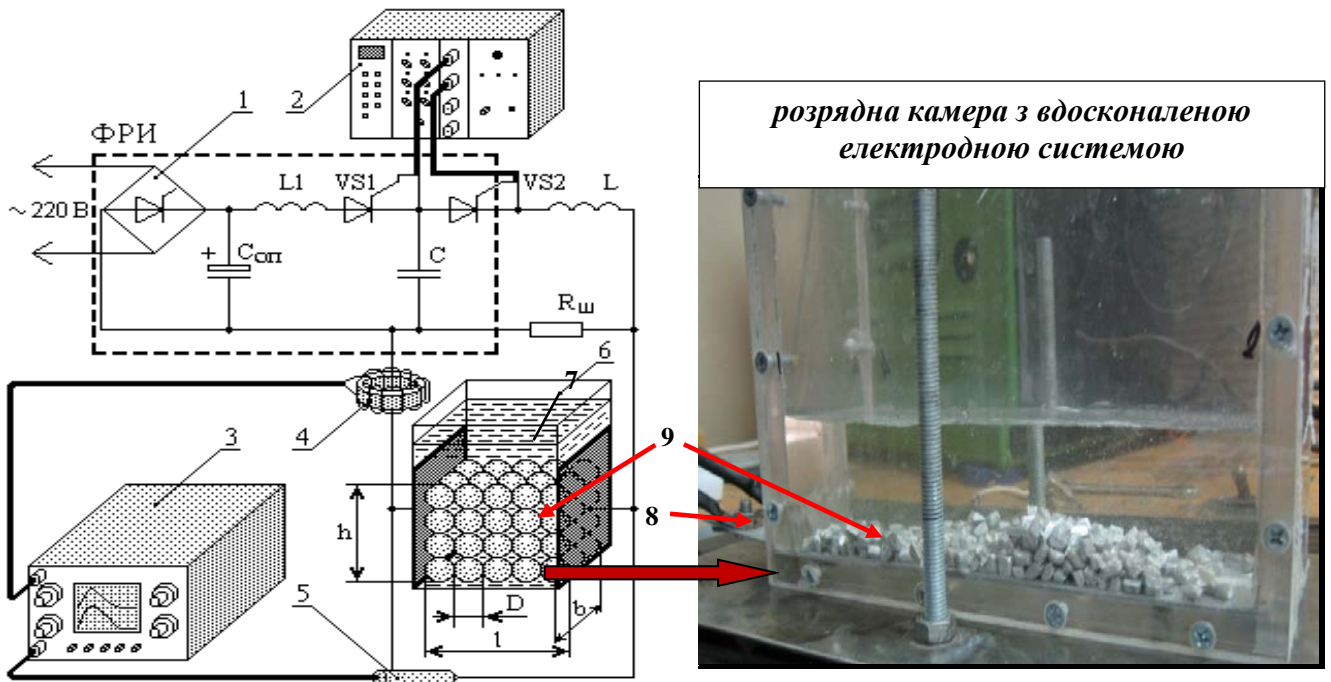


Рисунок 1 - Схема експериментальної електроіскрової установки та загальний вигляд розрядної камери: 1 – керований випрамляч; 2 – блок управління генератором розрядних імпульсів; 3 – осцилограф; 4 – трансформатор струму; 5 – подільник напруги; 6 - розрядна камера; 7 - слабопровідна рідина; 8 – електродна система; 9 - струмопровідний шар гранул металу

За крайових умов:

$$n = n_0 \Rightarrow r > R; \quad t = 0$$

$$n = 0 \Rightarrow r = R; \quad t > 0$$

$$n = n_0 \Rightarrow r \rightarrow \infty.$$

Проінтегрувавши рівняння (1), отримаємо вираз для потоку частинок через поверхню, який визначає число зіткнень «швидкої коагуляції» з тестовою частинкою:

$$J = D \left( \frac{\partial n}{\partial t} \right)_{r=R} = \frac{Dn_0}{R} \left[ 1 + \frac{R}{\sqrt{\pi Dt}} \right]. \quad (2)$$

Оскільки в технологічних апаратах коагуляція відбувається не в організованому потоці дисперсного середовища (апаратах ідеального витищення), а в апаратах змішувального типу (апаратах ідеального змішування, в яких концентрація розподіленої речовини в усіх точках апарата та у вихідному потоці з нього однакова), то приймаємо, що рідина знаходиться в «квазірівноважному стані», тобто виконується умова:

$$\bar{U} = \frac{G}{\rho F} \ll v_\lambda, \quad (3)$$

де  $\bar{U}$  – макроскопічний масштаб швидкості;  $G$  - витрата рідини;  $\rho$  - густина рідини;  $F$  – площа поперечного перерізу апарата;  $v_\lambda$  - внутрішній масштаб швидкості

турбулентних пульсацій.

Цю задачу проаналізуємо за таких умов:

- радіус коагуляції тестової частинки значно менший за внутрішній масштаб турбулентності  $\lambda = (\nu^3/\varepsilon)^{0,25}$ ,  $\lambda$  - в апаратах промислового типу знаходиться в межах  $10^{-4} - 10^{-5}$  м, що значно перевищує діаметр колоїдних частинок і, тим більше, наночастинок;  $\varepsilon$  – швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності;  $\nu$  – кінематична в'язкість рідини;

- всі частинки беруть участь у турбулентному обміні енергією;
- турбулентність ізотропна, гомогенна;
- процес має стаціонарний характер (квазірівноважений).

Оскільки турбулентний ізотропний рух є неупорядкованим, то рух частинок подібний до броунівського та накладається на нього. Тобто, частинки одночасно коагулюють і за броунівським, і за турбулентним ізотропним механізмами.

Подібно броунівського руху прийmemo, відповідно, до гіпотези Буссінеска, поняття «турбулентного коефіцієнта дифузії» та сформулюємо задачу дифузії за умови стаціонарності процесу:

$$\operatorname{div}(D_{\text{eff}} \operatorname{grad} n) = 0. \quad (4)$$

Оскільки процес стаціонарний, то  $n$  – середня величина концентрації частинок в часі. Тоді ефективний коефіцієнт дифузії  $D_{\text{eff}}$  буде мати вигляд:

$$D_{\text{eff}} = D + D_m, \quad (5)$$

де  $D$  – коефіцієнт молекулярної дифузії, так званий «броунівський»;  $D_m$  - коефіцієнт турбулентної дифузії.

Граничні умови задачі:

$$n = 0 \Rightarrow r = R;$$

$$n = n_0 \Rightarrow r \rightarrow \infty.$$

Для визначення коефіцієнта дифузії  $D_m$  скористаємося аналогією між перенесенням імпульсу енергії та маси. Тоді, відповідно, до теорії «довжини шляху змішування» Л. Прандтля  $D_m$ , можна записати у такому вигляді:

$$D_m \approx \nu' l, \quad (6)$$

де  $\nu'$  – осереднена пульсація швидкості;  $l$  – довжина шляху змішування.

Цей вираз подібний виразу для молекулярної дифузії, отриманий в молекулярно-кінетичній теорії, однак, на відміну від чітко визначеної довжини пробігу молекули  $l_T$  для турбулентного руху, довжину шляху змішування чітко не визначено. Менш чітко можна визначити і пульсаційну швидкість.

Виходячи з того, що в рідині подолати інерційно-гравітаційні сили можуть лише тривимірні вихори з характерним розміром  $l$  та певним перепадом швидкостей  $\Delta \bar{U}$ , і, відповідно, до масштабу  $l$  турбулентність буде тривимірно ізотропною. Відповідно до теорії локально-ізотропної турбулентності Колмогорова,  $\Delta \bar{U}$  запишемо у вигляді:

$$\Delta \bar{U} \sim (\varepsilon l)^{1/3}. \quad (7)$$

Слід зазначити, що в статистичній теорії Колмогорова параметри турбулентності визначено, виходячи з міркувань розмірності та гіпотези про

ступеневу передачу енергії від найбільших до найменших вихорів, в яких і відбувається дисипація кінетичної енергії турбулентності.

Якщо до деякого визначального масштабу  $l_0$  турбулентність тривимірно-ізотропна, то єдиними визначальними параметрами для процесів, що не перевищують за розмірами цей масштаб, будуть  $\varepsilon$  та  $l$ . У цьому випадку, з міркувань розмірності для ізотропного коефіцієнта дифузії, отримуємо:

$$D_m = K_1 \varepsilon^{1/3} l^{4/3}, \quad (8)$$

де  $K_1$  - деяка універсальна безрозмірна стала.

Цей вираз, очевидно, отриманий для області  $l > \lambda$ , адже за досягнення розмірів в області дифузії  $l \approx \lambda$  активну роль у дисипації енергії починають відігравати вихори малих масштабів.

Згідно з рівнянням (8) коефіцієнт турбулентності обміну зростає зі збільшенням масштабу процесу в степені 4/3. Очевидно, що цей процес буде відбуватися до масштабу  $l_0$ , після чого зростання  $D_m$  повинно зупинитися. Відповідно, максимальне значення  $D_m$  матиме вигляд:

$$D_m^{\max} = K_1 \varepsilon^{1/3} l_0^{4/3}. \quad (9)$$

Однак, у цій області  $l > \lambda$  значення  $D_m$  значно перевищує дифузійно-молекулярну складову  $D$ , відповідно, основний опір дифузії знаходиться в області малих масштабів  $l < \lambda$  (можна зробити висновок, що в області  $l > \lambda$  градієнт концентрацій частинок прямує до нуля із  $l = \infty$ ).

В області  $a/2 < l < \lambda$  коефіцієнт турбулентності дифузії зменшується в діапазоні:

$$0 < D_m < K_1 \varepsilon^{1/3} \lambda^{4/3}, \quad (10)$$

що є аналогією з теорією «довжини шляху змішування» Прандтля.

Відповідно до теорії Колмогорова цей діапазон можна умовно назвати областю «загасання турбулентності», а для аналізу зміни коефіцієнта турбулентного перенесення можна застосувати «принципи рухомої термодинамічної рівноваги» Ле Шательє-Брауна у вигляді «рівняння загасання» («рівняння релаксації»).

Введемо безрозмірні змінні:

$$l' = \frac{l}{a/2}; \quad D'_m = \frac{D_m}{D_{m\infty}}. \quad (11)$$

Коефіцієнт затухання визначимо як:

$$z = 1 - D'_m.$$

Тоді, рівняння затухання запишемо у вигляді:

$$\frac{dz}{dl} = c_1 z.$$

Граничну умову запишемо у вигляді:

$$z = 1 \text{ при } l' = 1.$$

Тоді отримуємо:

$$D'_m = 1 - z = 1 - \exp[c_1(l' - 1)]. \quad (12)$$

Для визначення  $c_1$  запишемо умову:

$$D_m = D_{m\lambda} = K\varepsilon^{1/3} \lambda^{4/3} \text{ при } l' = l'_\lambda = \frac{\lambda}{a/2}. \quad (13)$$

У результаті отримаємо:

$$c_1 = \frac{\ln(1 - D'_{m\lambda})}{l'_\lambda - 1}. \quad (14)$$

Виконавши апроксимацію рівнянь (11) – (14) «псевдоньютонівським методом» (коефіцієнт детермінації 99,1 %) в межах:

$$a/2 < l' < \lambda, \text{ де } a/2 \approx 10^{-7} \text{ м}; \lambda \approx 10^{-5} \text{ м}; D_{m\lambda} \approx 0,8D_{m\infty}.$$

отримаємо рівняння коефіцієнту турбулентної дифузії:

$$D'_\tau = 0,0368(l')^{0,677}, \quad (15)$$

Розглянемо поле концентрації частинок в області  $a/2 < l < \lambda$ . У цій області  $D_m$  зменшується зі зменшенням масштабу турбулентних пульсацій. Очевидно, що за певного значення масштабу пульсацій  $D_m$  стане меншим від  $D_{\text{бр}}$ . Якщо визначити цей масштаб як:

$$D_{m\lambda} 0,0368 \left( \frac{l_1}{\lambda} \right)^{0,677} = D_{\text{бр}}, \quad (16)$$

то при  $l < l_1 \Rightarrow D_m < D_{\text{бр}}$ ;

при  $l_1 < l \Rightarrow D_{\text{бр}} < D_m$ .

Тобто, якщо радіус коагуляції навколо частинки  $R$  такий, що  $R > \lambda$ , то переважно дифузія здійснюється турбулентним механізмом.

Розглянемо випадок:

$$R > l_1 = (27,2 \cdot \frac{D_{\text{бр}}}{D_{m\lambda}})^{1,48} \cdot \lambda. \quad (17)$$

За умови, що розв'язок крайової задачі визначається лише радіус-вектором  $r$ , проінтегруємо рівняння масоперенесення в циліндричних координатах за відповідних граничних умовах:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_{ef} r \frac{\partial n}{\partial r} \right) = 0. \quad (18)$$

Перше інтегрування дає можливість отримати для  $R > \lambda_1$ :

$$D_{m1} r^2 \frac{dn}{dr} = C. \quad (19)$$

Підставивши значення  $D_m$ , для відповідних областей, отримаємо:

$$K_1 \varepsilon^{1/3} r^{10/3} \frac{dn}{dr} = C_2; \text{ при } r > \lambda; \quad (20)$$

$$0,037 K_1 \varepsilon^{0,17} \nu^{1,95} r^{2,68} \frac{dn}{dr} = C_3; \text{ при } r < \lambda. \quad (21)$$

Інтегрування останнього рівняння потрібно проводити за допомогою чисельних методів внаслідок складності двошарової схеми зі спряженням потоків на межі шарів.

Для попереднього аналізу спростимо розрахункову схему, апроксимуючи в області  $r < \lambda$  залежність  $D_m \approx f(r)$  лінійною функцією, та припустивши  $n = n_0$  при  $r = \lambda\zeta$ .

Зважаючи на якісний характер аналізу, ці спрощення дають можливість отримати наближену картину процесу, яка дає загальні уявлення про характер перебігу процесу дифузії частинок.

У результаті інтегрування для області  $R < r < \lambda$  отримуємо вираз для поля концентрації частинок:

$$n = \frac{n_0 R^2 \lambda^2}{\lambda^2 - R^2} \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{r^2} \right). \quad (22)$$

Густина потоку частинок на поверхню сфери коагуляції  $r = R$ :

$$j = D_m \left( \frac{\partial n}{\partial r} \right)_{r=R} = K_2 n_0 \frac{1}{R} K_1 R = K_1 K_2 n_0, \quad (23)$$

де  $K_1 = 8 \cdot 10^{-3} K \varepsilon^{0,17} \nu^{1,95}$ ;  $K_2 = \frac{R^2 \lambda^2}{\lambda^2 - R^2}$ .

Тобто, густина потоку частинок через сферу коагуляції лише в незначній мірі залежить від розміру сфери.

В той же час повний потік частинок, тобто інтенсивність «швидкої» коагуляції турбулентним механізмом визначиться як:

$$N_m = 4\pi R^2 j = 4\pi R^2 n_0 K_1 K_2. \quad (24)$$

За значення швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності  $\varepsilon$  порядку  $10^2 - 10^4$  (м/с)<sup>2</sup> величина  $R > \lambda_1$  та, відповідно,  $N_T > N_{бр}$  для частинок, розмір яких становить  $10^{-7} - 10^{-8}$  м, в механізмі коагуляції менших частинок переважає броунівський механізм дифузії частинок і вплив інтенсивності процесу перемішування на каскадне перенесення кінетичної енергії турбулентності.

Враховуючи той факт, що існуючі технологічні апарати змішувального типу не забезпечують високого ступеню перемішування за рахунок високої дисипації потужності за її рівномірного розподілення в об'ємі апарату, отримані результати досліджень є корисними для практичного застосування під час керування інтенсивністю процесів коагуляції в них. Виходячи з того, що за низьких значень введеної ззовні в рідину енергії знижується кінетична енергія турбулентності, та відповідно, швидкість її дисипації, зростають масштаби турбулентного руху  $\lambda = (\nu^3/\varepsilon)^{0,25}$ , тобто зростають масштаби вихорів, відповідно для колоїдних частинок можна записати:

$$a < R < l_1 \ll \varepsilon. \quad (25)$$

З наведеного можна зробити висновок, що турбулентні механізми впливають на транспортування частинок лише на макрорівні. В той же час, на мікрорівні процес зближення частинок та їхнього зіткнення визначається броунівським механізмом, інтенсивність якого залежить від потоку частинок через поверхню, який визначає число зіткнень «швидкої коагуляції» в контактах між частинками і залежить від розмірності та концентрації дисперсної фази в дисперсійному середовищі. А оскільки під час броунівської коагуляції наночастинки інтенсифікують агрегатоутворення, то і в ізотропно-турбулентній рідині, відповідно,



до умов роботи технологічних апаратів харчових виробництв забезпечується ідеальне змішування між частинками дисперсних фаз, за якого їхня концентрація в усіх точках апарата та у вихідному потоці з нього розподілена рівномірно. Тобто, чим інтенсивніший процес перемішування суспензії, тим значнішу роль у процесі коагуляції, седиментації та фільтруванні відіграють наночастинки, які включаються в турбулентний вихоровий рух і покращують макрореологічні характеристики структурованих дисперсних систем. Розроблені рівняння для визначення швидкості дисипації кінетичної енергії в суспензії дають можливість визначити дисперсність частинок, при яких у механізмі коагуляції переважає броунівська дифузія частинок, що забезпечує кінетичну стійкість утворених коагуляційних структур. Одержані результати є важливими для практичного застосування під час керування інтенсивністю процесів коагуляції в апаратах змішувального типу.

**Четвертий розділ** «Аналітичне та експериментальне вивчення фізико-хімічних та електрофізичних властивостей наноматеріалів» присвячено дослідженню фізико-хімічних, електроповерхневих, цитотоксичних і бактерицидних властивостей наночастинок металів *Al*, *Mg*, *Mn*, *Ag* та нанокompозитів за використання різних способів їхнього одержання.

На основі моделювання «швидкої коагуляції» в багатофазних дисперсних системах під дією турбулентності для інтенсифікації процесів екстрагування, очищення та мікронутрієнтного збагачення харчових продуктів запропоновано застосування економічно доцільних диспергаційно-конденсаційних методів (електроіскровий та електронно-променевий) одержання наночастинок багатозарядних полівалентних металів *Al*, *Mg*, *Mn* з комплексоутворюючими властивостями та металу срібла *Ag* з бактерицидними властивостями. Як варіант порівняння, для досліджень використовували матеріали, які традиційно використовують у харчовій промисловості, а саме - сульфат алюмінію  $Al_2(SO_4)_3$ , кальцієвмісні (гіпс, вапняк) і каоліновмісні (біла фармацевтична глина) мінерали. Показано, що за використання хімічного способу формується дисперсна система, властивості якої безпосередньо залежать від природи вихідних речовин. При цьому величина електрокінетичного потенціалу ( $\zeta$ -потенціалу) та середнього гідродинамічного радіусу для золю сульфату срібла  $Ag_2SO_4$  становила, відповідно, мінус 2,98 мВ та 7,0 нм, для золю сульфату алюмінію  $Al_2(SO_4)_3$  – відповідно, мінус 3,66 мВ та 225,0 нм, а за величиною водневого показника вони належать, відповідно, до слабо- ( $pH = 5,2$ ) та середньокислого ( $pH = 3,8$ ) середовища. Отримання наночастинок алюмінію здійснювали електронно-променевим випаровуванням металу та *NaCl* з наступною їхньою конденсацією та стабілізацією поліетиленгліколем марки ПЕГ 600 (рис. 2). Встановлено, що за використання електронно-променевого способу одержується дисперсна система, в якій дисперсійне середовище – гель, дисперсна фаза – частинки металу *Al* з розмірністю в межах 4 - 11 нм.

Показано, що в результаті електронно-променевого випаровування на підкладці формується конденсат, який містить наночастинки *Al* розмірністю 6 - 7 нм сферичної форми. Наявність сольватної оболонки з хлориду натрію забезпечує уповільнений їх ріст в процесі конденсації та запобігає агломерації. Це дозволяє

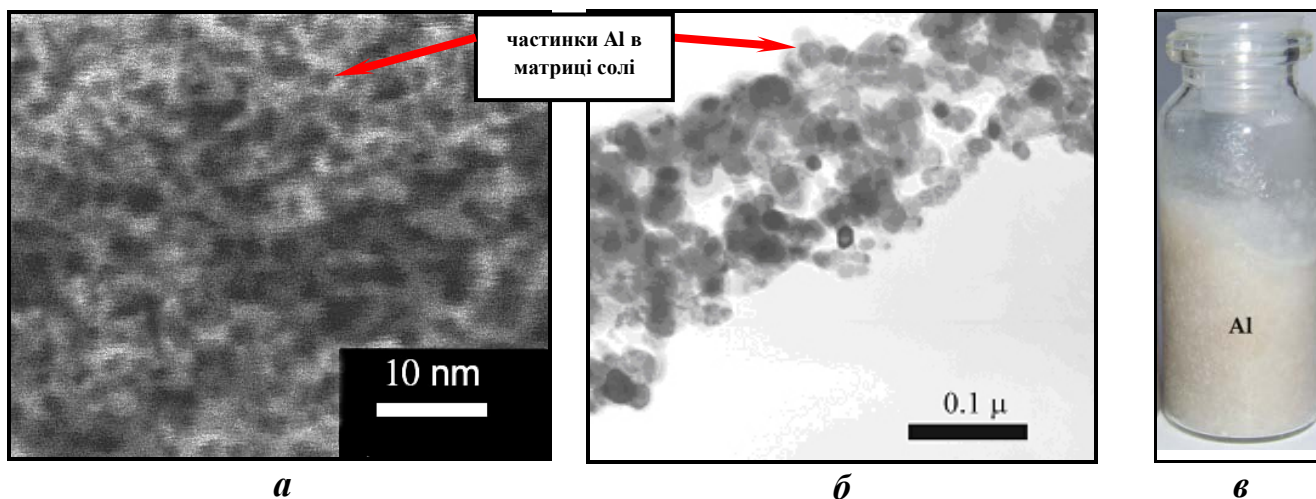


Рисунок 2 - ТЕМ зображення наночастинок алюмінію та зовнішній вигляд гелю алюмінію електронно-променевого способу: *a* і *б* – конденсат, що формується за сумісного осадження парових потоків хлориду натрію та частинок алюмінію; *в* - гель алюмінію

зберігати такі частинки за звичайних умов, а в разі необхідності видалити оболонку за рахунок взаємодії з водою.

Аналіз результатів досліджень одержання механічного диспергування кальцієвмісних (гіпс, вапняк) і каоліновмісних (біла фармацевтична глина) мінералів свідчить, що розміри твердої фази частинок гіпсу та вапняку перебувають в мікророзмірному діапазоні (табл. 1), а розробленого преміксу «Наномікроент» - в нанорозмірному (рис. 3).

Таблиця 1 - Характеристики кальцієвмісних мінералів

Препарат	Концентрація препарату в розчині, мг/дм <sup>3</sup>	Характеристики розчинів реагентів		
		ζ-потенціал, мВ	розмір частинок, мкм	pH
Гіпс [CaSO <sub>4</sub> ]	400	+ 2,5	130,0	9,6
Вапняк [Ca(OH) <sub>2</sub> ]	400	+ 9,54	234,0	12,5

Встановлено, що премікс «Наномікроент» містить частинки шарувато-стрічкової форми довжиною до 3 - 4 мкм та товщиною від 50 до 500 нм. При цьому пори частинок представлено ультратонкими каналами з розміром до 1 нм. Виходячи з нанорозмірності лише у преміксу «Наномікроент» предмет подальших досліджень були дослідження його мінерального складу та фізико-хімічних властивостей. Аналіз одержаних структурно-фазних властивостей «Наномікроент» показав, що в процесі диспергаційного способу його одержання формується дисперсна фаза з утворенням частинок шарувато-стрічкової форми довжиною 3 – 4 мкм та товщиною 50 - 500 нм з каналами пор розміром до 1 нм, а також наявністю мінеральних речовин *K*, *Si*, *C*, *Mg*, *F*, *Ti*, *Al*, *Fe*. Показано, що така структура

порошку свідчить про його високу адсорбційну здатність до розчинників за рахунок міжмолекулярних сил взаємодії, зокрема до молекул води діаметром 0,28 нм.

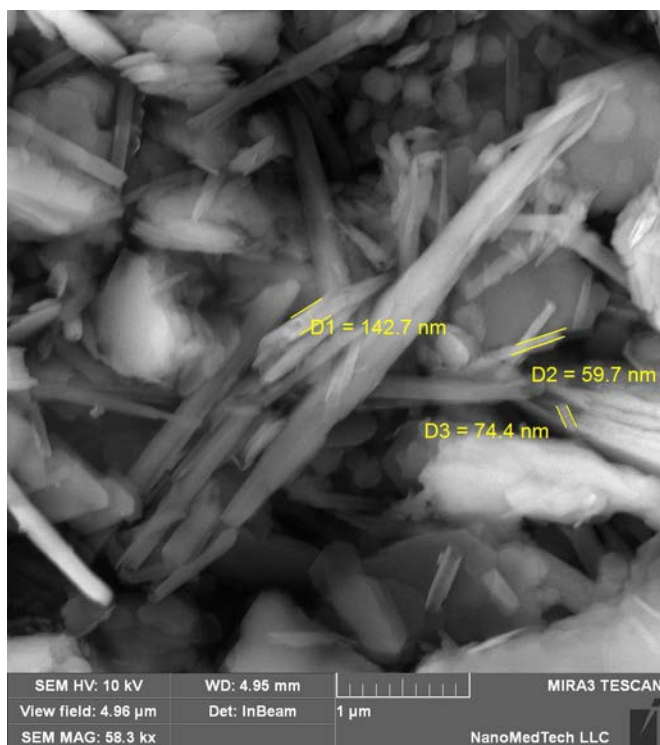


Рисунок 3 - ТЕМ зображення преміксу «Наномікроент» з товщиною пор 59,7 – 142,7 нм

Встановлено, що за умови використання електроіскрового способу формується дисперсна система, в якій дисперсійне середовище – рідина, дисперсна фаза – частинки металу сферичної форми нанорозмірного діапазону розмірності та  $\zeta$ -потенціалу в межах, відповідно, для *Ag*: 1 – 8 нм та мінус 32,1 мВ, *Mg*: 30 – 70 нм та плюс 10,3 мВ, *Mn*: 30 – 100 нм та мінус 5,07 мВ, *Al*: 1 – 30 нм та плюс 32,3 мВ (рис.4). Встановлено, що оптимальними параметрами процесу при цьому є напруга на електродах 60 – 80 В і тривалість диспергування 120 – 140 с за ємності конденсатора 100 мкФ. Рентгеноструктурним аналізом колоїдного розчину гідроксиду алюмінію, одержаного електроіскровим способом (далі ГОАЕС) встановлено, що тверда фаза складається в основному з моноклінної фази  $Al(OH)_3$  в кількості 96,0 % і слідів чистого  $Al_2O_3$  в кількості 4,0 %. Встановлено, що, залежно від *pH* системи спостерігається, зміна знаку  $\zeta$ -потенціалу ГОАЕС, що свідчить про перезарядження системи та здатність її до коагуляції (рис.5). Зміна *pH* в кисле середовище сприяє збільшенню кількості позитивно заряджених іонів  $Al^{3+}$ , а в лужне – негативно заряджених іонів  $AlO_2^-$ . При цьому зниження енергетичного бар'єру приводить до того, що метастабільна система самочинно переходить у більш стійкий стан, а дисперсна фаза частинок *Al* переходить у коагулянт з утворенням періодичних колоїдних структур  $[(x \cdot Al(OH)_3) \cdot (y \cdot Колоїд)]$ . Тому коагуляційна взаємодія між ГОАЕС та негативно зарядженими частинками буде максимальною в кислому середовищі, а з позитивно зарядженими – в лужному. Встановлено, що наночастинки металів *Ag*, *Mg*, *Mn*, *Al* не викликають загибелі первинних культур клітин і тканин, виділених з організму тварин і людини, а їхня життєдіяльність залежить від природи та концентрації твердої фази частинок металу в розчині. Показано, що всі вони сприяють активації проліферації клітин, а збільшення їхньої чисельності спостерігається за більших розведень розчинів металів.

Проведено дослідження *in vitro* впливу наночастинок *Ag*, *Mg*, *Mn*, *Al*, одержаних електроіскровим способом, на життєздатність клітин лінії *HEK-293*

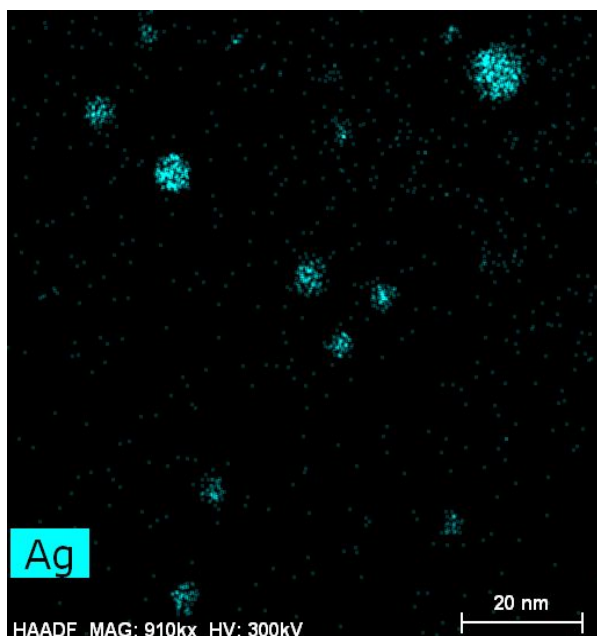
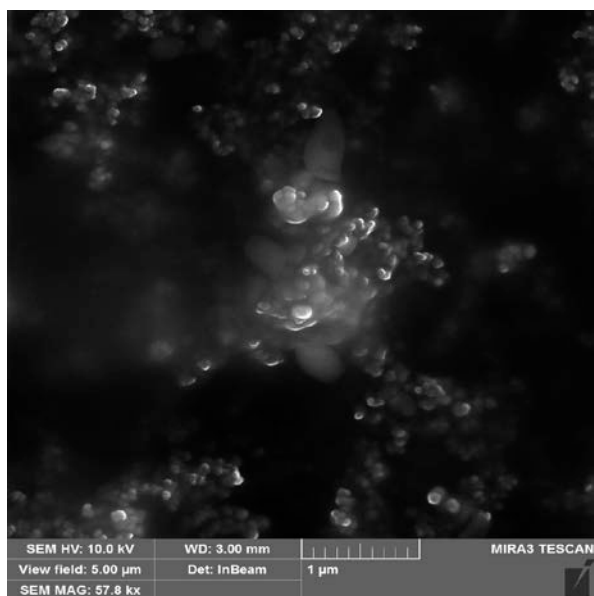
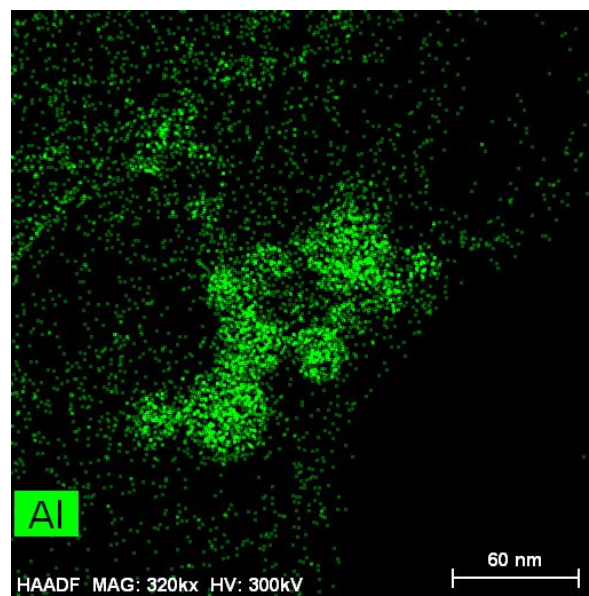
*a**б**в**г*

Рисунок 4 – ТЕМ зображення наночастинок металів, ержаних електроіскровим способом: *a* – діаметр частинок *Ag* 1 - 8 нм; *б* – діаметр частинок *Mg* 30 – 85 нм; *в* – діаметр частинок *Mn* 13...18 нм; *г* – діаметр частинок *Al* 10...30 нм

(ембріональні клітини нирки людини), *L-929* (перещеплювальні клітини фіброblastів миші), *PTP* (перещеплювальні клітини тестикулів поросят), *КСБ* (клітин спермії бика).

Встановлено, що за концентрації металів 75,0 мг/л та ступені їхнього розведення у відношенні 1 : 2 найбільший токсичний вплив на клітини лінії *HEK-293* виявляли колоїди металів *Ag* та *Mg*, а найменшу – *Al*, на клітини лінії *L 929* виявляли колоїди металів *Ag* та *Al*, на клітини лінії *PTP* виявляли колоїди металів *Ag* та *Al*. Встановлено, що миттєвої токсичності щодо рухливості клітин спермії бика у



колоїда *Ag* не спостерігалось, а колоїди *Al*, *Mg*, *Mn* відносяться до 4 класу малонебезпечних речовин, тобто нетоксичні і безпечні для застосування в харчових виробництвах.

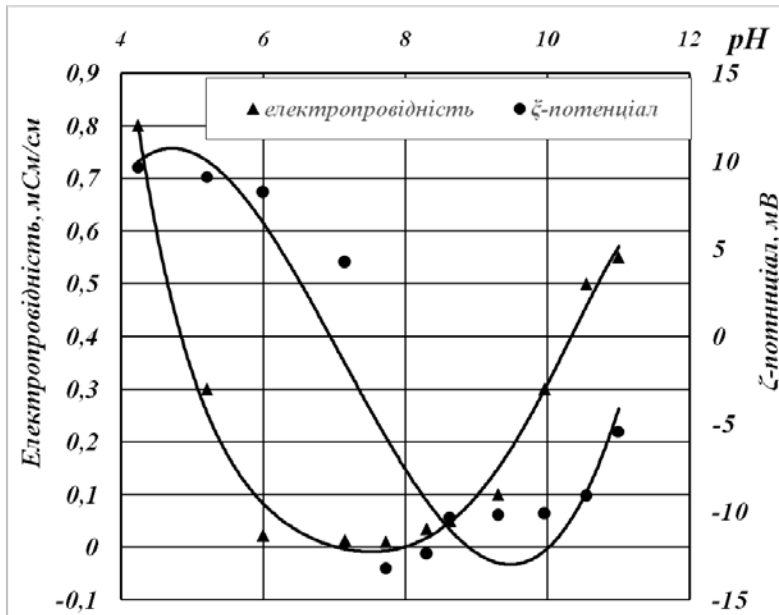


Рисунок 5 – Вплив рН на електропровідність та ζ-потенціал ГОАЕС

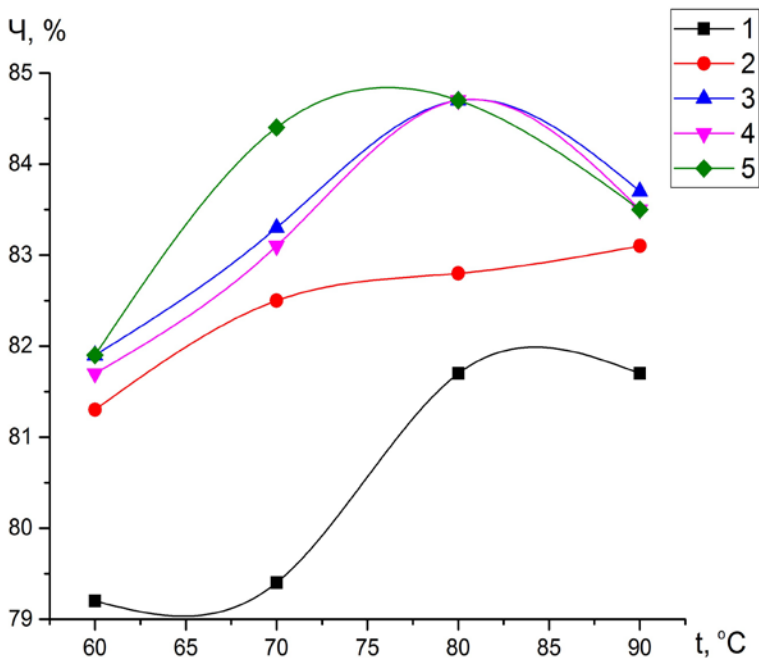


Рисунок 6 - Вплив термохімічної обробки екстрагенту на чистоту дифузійного соку: 1 – традиційний спосіб екстрагування; 2, 3, 4 і 5 – використанням, відповідно, розчинів гіпсу, сульфату алюмінію, гелю *Al* та ГОАЕС

Встановлено, що нанокompatитний премікс «Наномікроент» не володіє бактерицидними властивостями щодо тест-штамів мікроорганізмів кишкової палички *Esherichia coli* ATCC 8739 та стафілококу *Staphylococcus aureus* ATCC 6538, однак виявив високу адсорбційну активність до них.

У п'ятому розділі «Експериментальні дослідження впливу нанорозмірних дисперсних систем на масообмінні процеси харчових виробництв» наведено результати досліджень використання одержаних наноматеріалів у масообмінних процесах харчових виробництв.

Для досягнення максимальної результативності дифузійного процесу проведено підбір найбільш ефективних складових термохімічної підготовки екстрагенту. В якості реагентів для обробки бурякової стружки було розглянуто водні розчини глинозему (сульфату алюмінію  $Al_2(SO_4)_3$ ) та гіпсу ( $CaSO_4$ ), нанорозмірних ГОАЕС та гелю *Al*. Як варіант порівняння, користувалися типовим способом проведення дифузійного процесу.

Аналіз показників якості напівпродуктів, отриманих за схемою з попередньою термохімічною підготовкою екстрагенту свідчить про доцільність їхнього застосування (рис.6). Встановлено, що

оптимальною є температура екстрагування 70 °С. Встановлено, що ГОАЕС, порівняно з  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $CaSO_4$  та гелем  $Al$  має кращі комплексоутворюючі властивості до ВМС, що сприяє попередженню їхнього переходу в дифузійний та підвищити чистоту дифузійного соку. Встановлено, що застосування ГОАЕС меншої на порядок кількості дозволяє підвищити ефект очистки дифузійного соку на 47,3 % та зменшити в ньому вміст пектинових та білкових речовин, відповідно, на 56,3 та 39,2 %; підвищити чистоту жомопресової води (ЖПВ) на 5,5 % та зменшити в ній вміст пектинових і білкових речовин, відповідно, в 3,1 та 9,1 раз; знизити каламутність соку I – ї та, відповідно, на 82,2 % та 82,8 %, вміст солей  $Ca^{2+}$  в соку II сатурації в 2,4 рази. Проведено експериментальні дослідження щодо доцільності застосування розчинів реагентів для підвищення тепломасообмінних критеріїв процесу екстрагування та встановлення раціональних параметрів термохімічної обробки екстрагента.

В дійсності в екстракційних установках під час екстрагування шару твердого тіла бере участь не вся поверхня, а лише її частина, тому коефіцієнти дифузії, отримані під час розрахунку кінетичних коефіцієнтів методом Г.А. Аксельруда, можна визначити з виразу (26):

$$D = K_D D_T, \quad (26)$$

де  $K_D$  - коефіцієнт ефективної молекулярної дифузії,  $D_T$  – теоретичний коефіцієнт молекулярної дифузії,  $m^2/s$ .

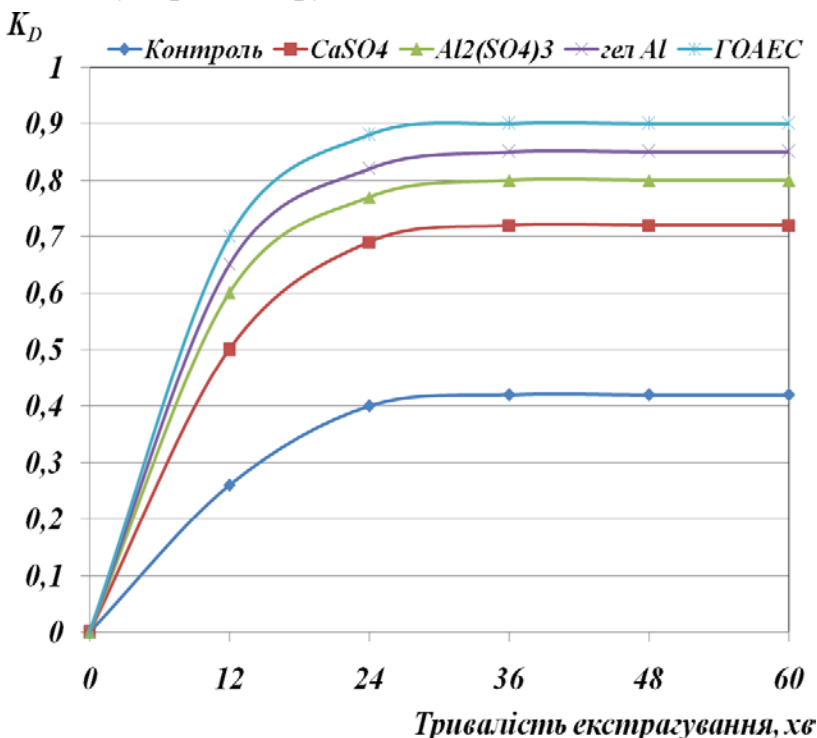


Рисунок 7 - Вплив термохімічної обробки екстрагента на коефіцієнт ефективної молекулярної дифузії  $K_D$

Аналіз результатів досліджень показав, що термохімічна обробка стружки підвищує ступінь проникності бурякової тканини, в результаті чого підвищується величина коефіцієнта ефективної молекулярної дифузії  $K_D$  (рис. 7). Встановлено, що максимальне дифундування сахарози спостерігається в фазі прискореного вилучення під час термохімічної обробки бурякової тканини ГОАЕС, що відповідає режиму екстрагування 36 хв, після чого спостерігається сповільнення процесу.

Проведено дослідження впливу термохімічної обробки екстрагента на пружно-міцнісні властивості та вологоутримуючу здатність клітин бурякової тканини (рис. 8). З аналізу

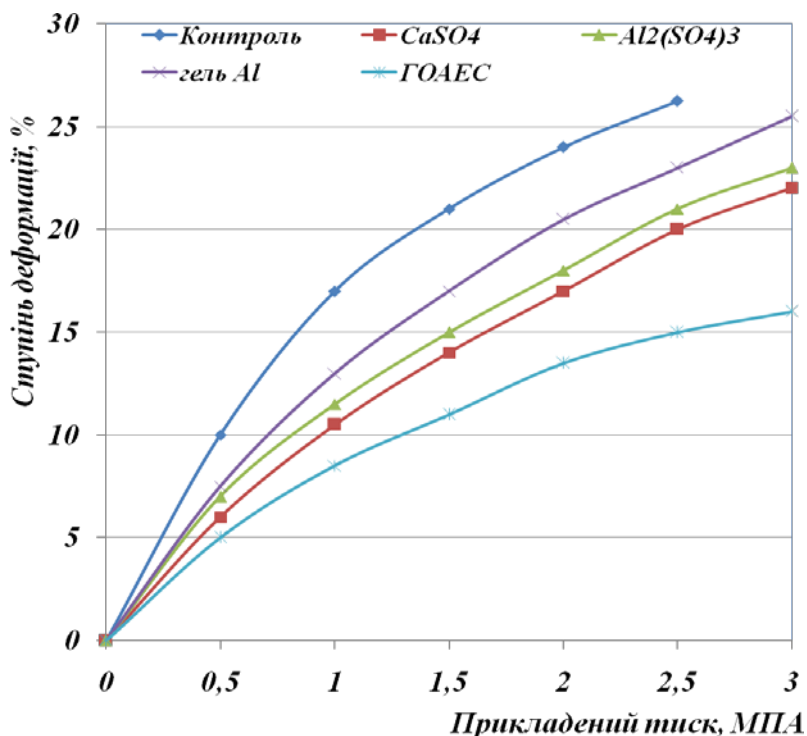


Рисунок 8 - Вплив термохімічної обробки екстрагентом на деформаційні зміни зразків цукрового буряку

спостерігалися у зразка буряку обробленого ГОАЕС. Підвищену стійкість зразків цукрових буряків до прикладеного тиску можна пояснити високою хімічною активністю нанорозміного алюмінію ГОАЕС. Іони  $Al^{3+}$  здатні утворювати в поверхневому шарі бурякової тканини нерозчинні комплексні сполуки з пектиновими речовинами та речовинами білкового походження, які, адсорбуючись в шарах бурякової тканини, формують подібність молекулярного каркаса, що підвищує стійкість бурякової тканини до стискаючих навантажень.

Встановлено, що мінімальне вологоутримання на рівні 73,0 % та максимальне підвищення модуля пружності на 37,9 % спостерігається у бурякового жому, отриманого під час термохімічної обробки бурякової стружки розчином ГОАЕС. Показано, що для ефективного знецукрення бурякової стружки реагент повинен містити комплексоутворюючі іони  $Ca^{2+}$  чи  $Al^{3+}$ . Наявність їх в екстрагенті сприяє попередженню переходу ВМС у дифузійний сік та більш повному їхньому видаленню під час очистки. З огляду на те, що кращі показники якісних і масообмінних характеристик дифузійного процесу досягаються в присутності ГОАЕС, подальші дослідження проводили з використанням тільки цього реагенту. Проведено дослідження впливу термохімічної обробки на мікроструктуру бурякової стружки з застосуванням ГОАЕС (рис. 9). Встановлено, що бурякова тканина (див. рис. 9 б) після екстрагування відзначається істотними морфологічними змінами клітин, порушенням цілісності клітинних стінок, що зумовлено високим ступенем плазмолізу білкових компонентів та гідролізу пектинових речовин у результаті термічного впливу. При цьому дестабілізація клітинних стінок відбувається за

кривих деформаційних змін видно, що термохімічна обробка зразків буряку розчинами запропонованих реагентів дозволяє зменшити величину деформації дослідних зразків порівняно з показниками контрольного зразка, що не піддавався термохімічній обробці. Крім того, величина контрольного зразка обмежена значенням тиску поршня 2,5 МПа.

За збільшення тиску відбувається незворотне руйнування зразка буряку. Для зразків буряку, підданих термохімічній обробці, величину тиску можна збільшити до 3 МПа. При цьому відбувається їх незначне стиснення без руйнування. Найменші деформаційні зміни



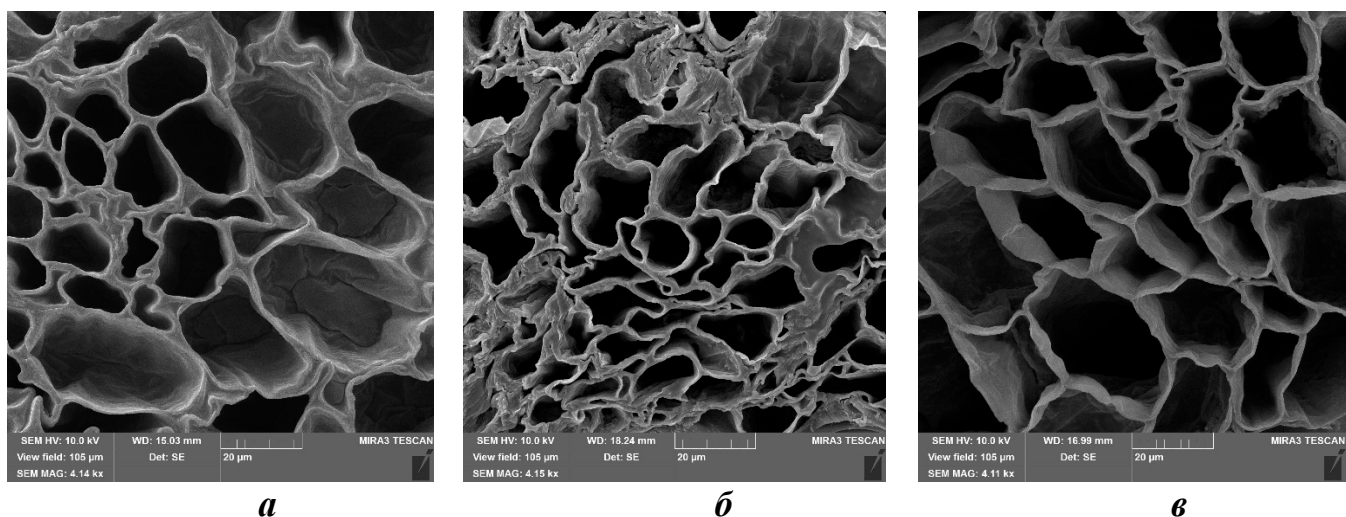


Рисунок 9 - ТЕМ зображення клітин бурякової стружки: *а* – до екстрагування; *б* і *в* – після екстрагування, відповідно, без та з використанням ГОАЕС

рахунок зниження їхньої товщини, в результаті чого руйнується клітинних каркас бурякової тканини, що погіршує взаємодію екстрагента з клітинним вмістом і перехід в нього нецукрів. На зображенні мікроструктури тканини (див. рис. 9 *в*), яка піддавалася термічній обробці з застосуванням ГОАЕС, помітне зниження товщини клітинних стінок через досягнення високого ступеня денатурації білкових компонентів протоплазми.

Це доводить, що застосування ГОАЕС дозволяє інтенсифікувати термоплазмоліз бурякової тканини і домогтися більш високої її проникності. За його взаємодії з речовинами білково-пектиного комплексу утворюються нерозчинні комплекси, що осідають в поверхневому шарі бурякової тканини та сприяють збереженню її пружного каркасу.

Результати досліджень показують, що використання коагулянту ГОАЕС дозволяє покращити агрегування по всьому спектру крупності дисперсії, в т.ч. в області частинок, що утворюють кольоровість і каламутність (рис. 10).

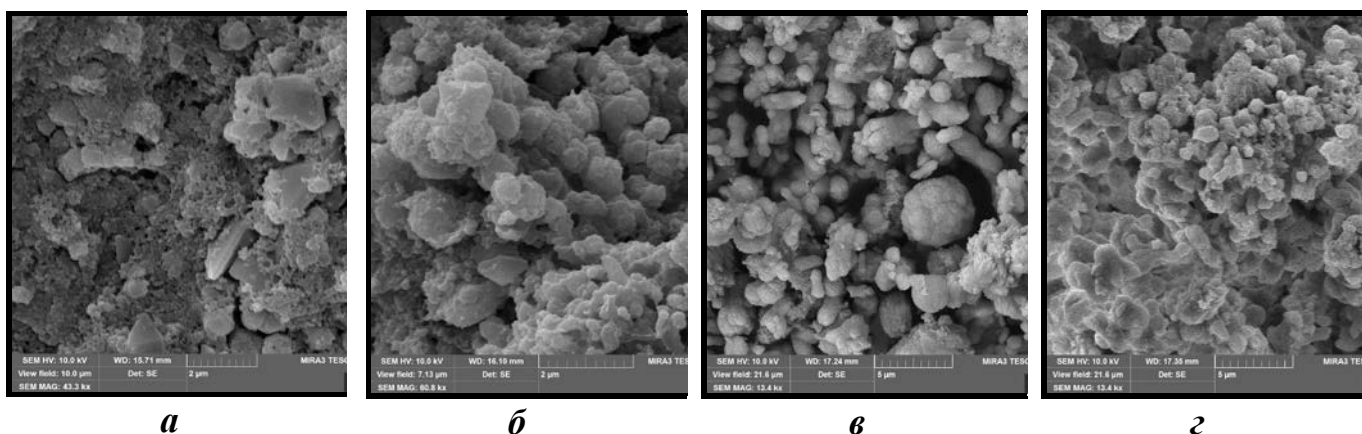


Рисунок 10 - ТЕМ зображення осаду соків: *а і б* – відповідно, осад соку попередньої дефекації без та з використанням ГОАЕС; *в і г* – відповідно, осад соку 1-ї сатурації без та з використанням ГОАЕС

Досягнутий ефект коагулянту ГОАЕС можна пояснити тим, що за рахунок селективної дії, що пов'язана з нанорозмірністю частинок алюмінію (1 - 30 нм) та високим позитивним електрокінетичним потенціалом (+32,3 мВ) інтенсифікується коагуляція ВМС спільно з іонами  $Ca^{2+}$  вапняного молока  $Ca(OH)_2$ , в результаті чого відбувається фізико-хімічне очищення дифузійного соку шляхом агрегування нецукрів з відділенням осаду фільтруванням. Встановлено, що ГОАЕС, порівняно з  $Al_2(SO_4)_3$  та гелем  $Al$  має кращі комплексоутворюючі властивості до ВМС ЖПВ (табл.2). Встановлено, що його використання сприяє підвищенню чистоти ЖПВ на 5,5 %, зниженню в ній вмісту білкових та пектинових речовин, відповідно, на 63,5 % та 89,1 %.

Таблиця 2 - Вплив реагентів на показники жомопресової води

Спосіб екстрагування		Чистота ЖПВ		Вміст речовин			
				білкових		пектинових	
		%	різниця у %	%	різниця у %	%	різниця у %
Без додавання		72,2	0	0,817	0	0,75	0
З додаванням розчину	$Al_2(SO_4)_3$	73,6	1,94	0,717	12,2	0,65	13,3
	гелю $Al$	75,8	5,0	0,365	55,3	0,120	84,0
	ГОАЕС	76,2	5,5	0,265	63,5	0,082	89,1

Встановлена відсутність залишкового вмісту  $Al^{3+}$  коагулянту ГОАЕС в напівпродуктах бурякоцукрового виробництва (дифузійний, переддефекований і очищений соки, знесолоджена бурякова стружка) засвідчує безпечність термохімічної обробки бурякової стружки з застосуванням ГОАЕС (табл. 3).

Таблиця 3 - Вміст алюмінію в напівпродуктах бурякоцукрового виробництва

Спосіб екстрагування	Концентрація реагенту в екстрагенті, % до к.б.	Вміст алюмінію				
		бурякова стружка, мг/кг		дифузійний сік мг/л	Переддефекований, мг/л	фільтрований сік П сатурації, мг/л
		до екстрагування	після екстрагування			
Без додавання	-	80	79,59	1,41	-	-
З додаванням ГОАЕС	0,005	-	83,59	2,41	-	-
Величина прореагованого алюмінію	-	-	4,0	1,0	-	-

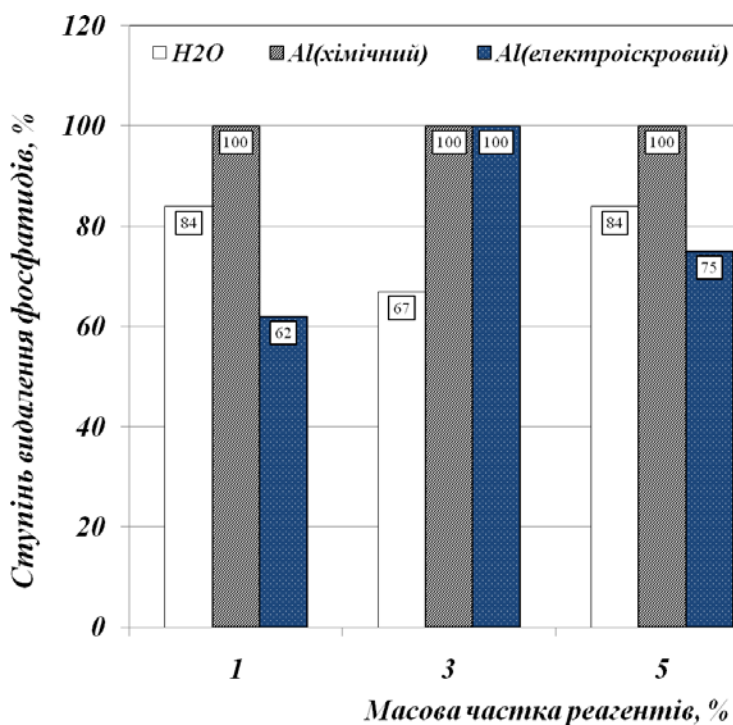


Рисунок 11 - Вплив реагентів на ступінь видалення фосфатидів з нерафінованої соєвої олії

100 %; розчину ГОАЕС в кількості 1 %, 3 % та 5 % - вилученню, відповідно, 62 %, 100 % та 75 %.

Встановлено, що використання преміксу «Наномікроент» сприяє підвищенню бродильної активності хлібопекарських дріжджів за рахунок активації ферментів амілолітичної дії та мікроелементного живлення дріжджових клітин, в результаті чого підвищується величина газоутворення на 25 %, підвищується вміст кальцію на 6,7 %, фосфору – на 3,9 %, калію – на 4,8 %, магнію – на 18 % та заліза – на 86,7 %. Встановлено, що додавання до вихідної сировини розробленого нанокompозитного преміксу «Наномікроент» сприяє стабілізації структурних і фізико-хімічних властивостей готових хлібобулочних виробів за рахунок збільшенню діаметрів та кількості пор, підвищенню величини активності вологи та її перерозподілу по об'єму пор, і як наслідок подовження терміну їх зберігання в неупакованому вигляді (рис. 12). Крім того розподілення пор по радіусам вказує на те, що пори в зразках розподілені майже однаково. Найменша кількість малих пор у зразка з додаванням преміксу «Наномікроенту» та *NaCl*, відповідно, 1,0 % та 1,3 % до м.б., тому він на узагальненому графіку ізотерм адсорбції нижчий за всі, тобто заповнення пор парами води відбувається повільніше і об'єм пор у нього дещо менший, ніж в інших зразках. Аналіз отриманих результатів досліджень зміни кількості вологи всередині пор хліба під час його зберігання показує, що використання преміксу «Наномікроент» у кількості 1,3 % до м.б. підвищує показник активності води, в той час як використання *NaCl*, особливо у кількості 1,3 % до м.б., навпаки понижує її (рис. 13). Вірогідно це пов'язано зі здатністю преміксу до утримання води в хлібі на молекулярному рівні, і як наслідок – подовження терміну його зберігання. Встановлено, що застосування наночастинок металів, одержаних електролітичним способом покращує показники хлібопекарського тіста та готових

Аналіз результатів досліджень впливу води, розчинів сульфату алюмінію та ГОАЕС на ступінь видалення фосфатидів із нерафінованої соєвої олії показав, що всі реагенти мають коагулюючу здатність до фосфатидів, а ефективність процесу залежить від їхньої концентрації в розчині, при цьому розчин  $Al_2(SO_4)_3$  виявив кращі коагулюючі властивості (рис. 11).

Встановлено, що використання традиційної гідратації в кількості 1 %, 3 % та 5 % сприяє вилученню фосфатидів, відповідно, на 84 %, 67 % та 84 %; розчину  $Al_2(SO_4)_3$  в кількості 1 %, 3 % та 5 % - вилученню у всіх випадках на

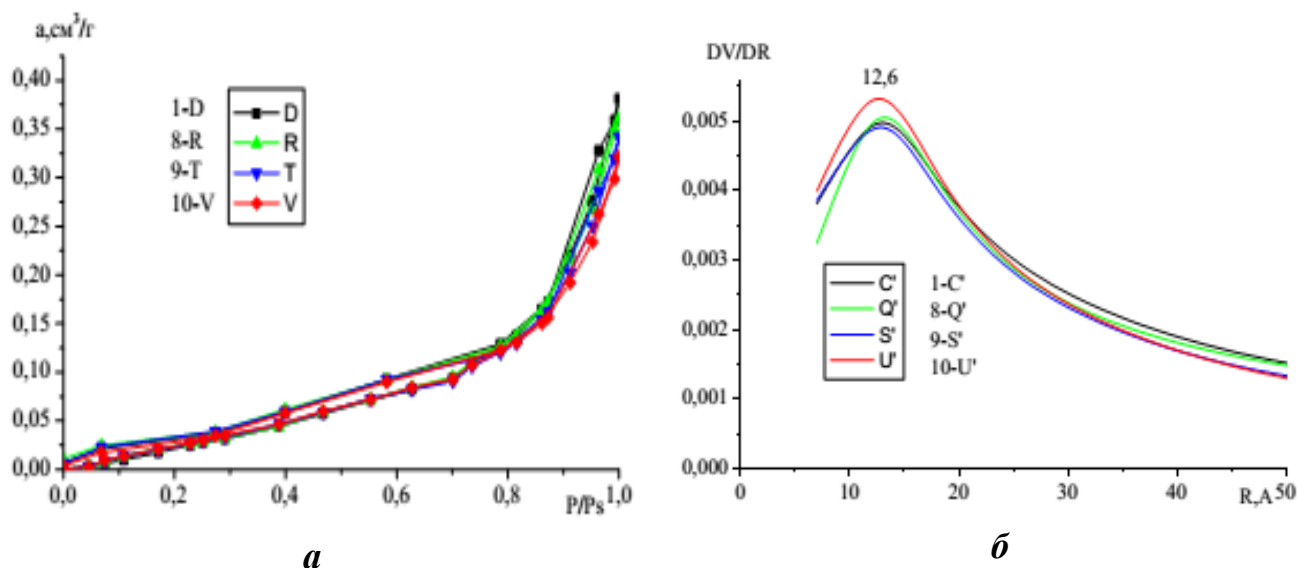


Рисунок 12 - Вплив преміксу «Наномікроент» на сорбційні властивості хліба пшеничного: **a** і **б** – відповідно, ізотерми сорбції та десорбції; 1-D, 1-C' – без додавання; 8-R, 8-Q' - з додаванням 1 % преміксу; 9-T, 9-S' - з додаванням преміксу та NaCl, відповідно, 1,0 % та 0,6 %; 10-V, 10-U' - з додаванням преміксу та NaCl, відповідно, 1,0 % та 0,6 %

виробів. Показано, що наночастинки *Mg* підвищують величину газоутворення в тісті на 17,4 %, збільшують об'єм, пористість і свіжість хліба, відповідно, на 4,2 %, 2,4 % та 6,4 %; наночастинки *Mn* - підвищують величину газоутворення в тісті на 14,0 %, збільшують об'єм, пористість і свіжість хліба, відповідно, на 2,1 %, 4,9 % та 19,1 %; наночастинки *Mn* і *Mg* - підвищують величину газоутворення в тісті на 23,3 %, збільшують об'єм, пористість та свіжість хліба, відповідно, на 10,4 %, 4,9 % та 72,3 %. Крім того, за використання наночастинок *Mg* відбувається відбілювання м'якушки хліба, що є актуальним у разі перероблення пшеничного борошна першого сорту. Проведено аналіз мінерального складу демінералізованої підсирної сироватки та обґрунтовано, що більш ефективно здійснювати її штучне нутрієнтне збагачення додаванням наночастинок *Mn* і *Mg*, одержаних електроіскровим способом. Гранулометричний склад порошку сироватки, збагачений наночастинками *Mn* і *Mg* характеризується однорідними за розміром дисперсними частинками (рис.14). Отриманий порошок характеризувався зниженням індексу розчинності та активності води, відповідно, втричі та на 63,0 %, зниженням величини вологості на 35 %, збільшеним вмістом *Mg* та *Mn*, відповідно, в 6,8 та 11,7 раз і подовженим терміном зберігання з 20 до 28 місяців. Показано, що зниження забарвленості порошку з світло-жовто-білого до білого, як в процесі сушіння, так і в процесі зберігання, пов'язане з взаємодією твердої металевої фази *Mg* з білково-вуглеводними комплексами сироватки.

У шостому розділі «Оптимізація ефективності екстрагування та очистки сахарози з використанням наночастинок алюмінію, які одержані електроіскровим методом» наведено результати експериментальних досліджень та оптимізації використання нанорозмірного ГОАЕС в процесі

екстрагування сахарози та очищення дифузійного соку. На основі статистичних вибірок експериментальних даних з використанням пакету Mathcad 15 встановлено ефективну кількість ГОАЕС в процесах сокодобування та сокоочистки.

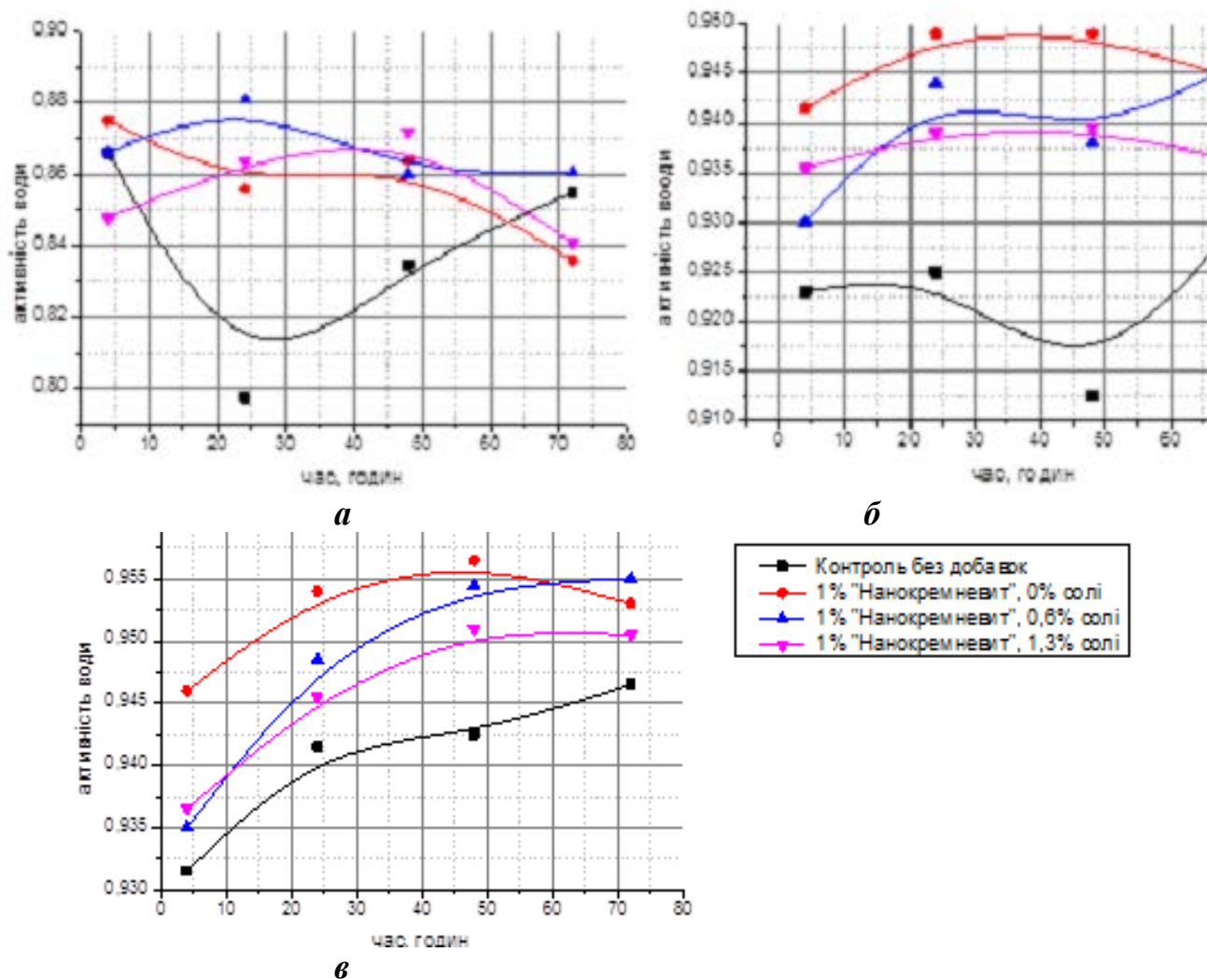


Рисунок 13 Зміна активності води всередині пор хліба пшеничного з використанням «Наномікроент» під час його зберігання: **а**– скоринці; **б**– підскоринковому шарі; **в**– м'якушці

Для вирішення поставленого завдання з оптимізації дослідних даних використовували узагальнений критерій оптимізації, що дозволяє одним кількісним показником узагальнити декілька обраних локальних критеріїв оптимальності:

$$F = \prod_{i=1}^n f_i(x)^{\lambda_i} \rightarrow \max, \quad (27)$$

де  $f_i(x)$  - локальні критерії оптимальності в безрозмірній формі;  $\lambda_i$  - вагові коефіцієнти,  $i = 1 - 3$ .

Обрано локальні критерії (в натуральній формі) для екстрагування сахарози:  $f_i(x) = y_1$  - чистота дифузійного соку, %;  $f_i(x) = y_2$  - вміст СР у пресованому жомі, %;  $f_i(x) = y_3$  - вміст пектинових речовин у дифузійному соці, % до к.с.; для



очищення дифузійного соку  $f_i(x) = y_1$  - чистота фільтрованого соку I сатурації, %;  
 $f_i(x) = y_2$  - каламутність фільтрованого соку I сатурації, %;  $f_i(x) = y_3$  - вміст білкових речовин у фільтрованому соці I сатурації, % до к.с.

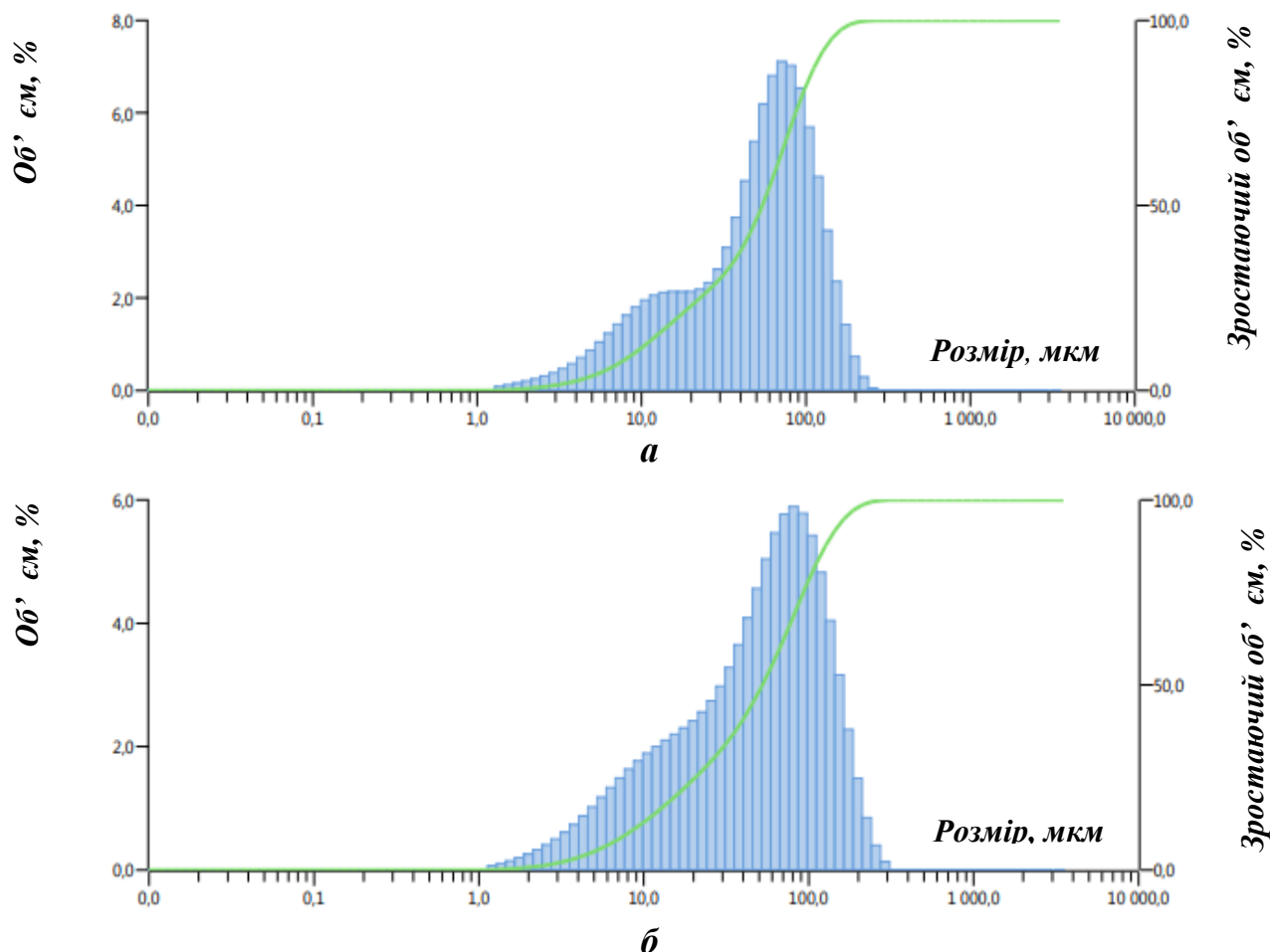


Рисунок 14 - Гістограма розподілення частинок порошку молочної сироватки за розмірами: *a* і *б* – відповідно, без та з додаванням колоїдних розчинів *Mg* та *Mn* електроіскрового способу

Вагові коефіцієнти з урахуванням важливостей локальних критеріїв оптимізації вибрано, відповідно, такі: 0,3 : 0,3 : 0,4. Одержані рівняння (в натуральних значеннях факторів), графічна інтерпретація залежності показників  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  та отримана залежність узагальненого критерію оптимальності від витрат коагулянту ГОАЕС (див. рис 15). Одержані узагальнені критерії оптимізації дозволили визначити ефективну кількість нанорозміного ГОАЕС для застосування в процесі екстрагування та очистки сахарози. Максимальне підвищення вмісту сухих речовин у віджатому жомі на 3,0 % спостерігається при величині ГОАЕС 0,0028 % до кількості б.с., а максимальне зниження каламутності фільтрованого соку I сатурації на 198 од. ICUMSA спостерігається при величині ГОАЕС 0,00325 % до к.с.

**У цьому розділі** «Реалізація науково-практичних результатів застосування наноматеріалів при виробництві харчових продуктів та розробка обладнання для їх

одержання» наведено рекомендації щодо практичного застосування результатів наукових досліджень.

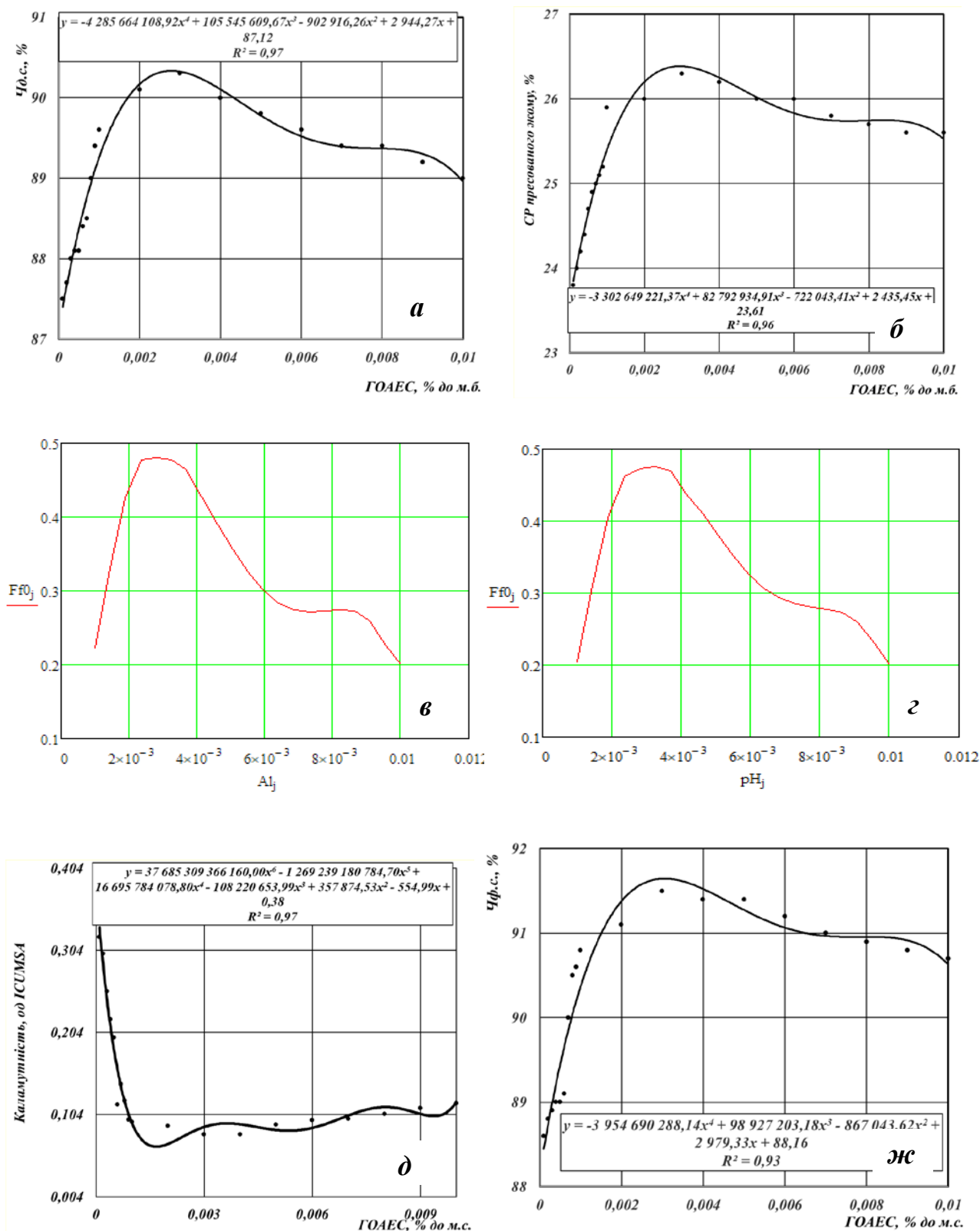


Рисунок 15 - Оптимізація ефективності застосування ГОАЕС: **а, ж** – відповідно, чистота дифузійного соку та соку I сатурації; **б**- вміст СР пресованого жому; **в, г** - критерії оптимальності сокодобування та сокоочистки; **д** – відповідно, каламутність соку I сатурації



Обґрунтовано, розроблено та впроваджено електроіскрову технологію одержання наночастинок металів *Al*, *Mg*, *Mn* та *Ag* (Пат. на корисну модель 113262) та нанопреміксу «Наномікроєнт» (Пат. на корисну модель 88967) в процесі екстрагування цукрози з бурякової стружки та очищення дифузійного соку, мікронутрієнтного збагачення сухої молочної сироватки та хлібобулочних виробів. Підтверджено технічну можливість одержання помірно-стійких нанодисперсних систем із розмірністю частинок *Al* 10 - 80 нм, *Mg* - 30 - 110 нм і *Mn* - 10 - 40 нм (рис.16). При цьому  $\zeta$ -потенціал наночастинок *Al* плюс 32,3 мВ, *Mg* – плюс 10,3 мВ і *Mn* - мінус 5,07 мВ.

Розроблено нормативні документи на виробництво наночастинок *Al* ТУ У 20.1-2799900706-001:2020 «Коагулянт «Алюкол» (алюміній колоїдний), на застосування коагулянту «Алюкол» (висновок № 12.2-18-1/24882 санітарно-епідеміологічної експертизи державної служби України з питань безпечності харчових продуктів та захисту споживачів). Апробовано та впроваджено на цукрових заводах ТОВ «Юкрейніан Шугар Компані» (Миколаївська обл.), ТОВ «Наркевицький цукровий завод» (Хмельницька обл.), ТДВ «Новоіванівський цукровий завод» (Харківська обл.) інноваційну технологію застосування ГОАЕС в бурякоцукровому виробництві (Пат. 104338, Пат. 114866, Пат. 117938, Пат. на корисну модель 130279), яка передбачає підвищення технологічних показників напівпродуктів і продуктів за рахунок структуроутворюючих та коагулюючих його властивостей з утворенням хімічних комплексів із нецукрами, руйнування стійкості колоїдів ВМС з переведенням їх із розчиненого стану в тверду фазу осаду.

Ця технологія передбачає дозування наночастинок ГОАЕС в технологічній схемі двохстадійного отримання дифузійного соку шляхом основного екстрагування сахарози та її довилучення глибоким пресуванням жому, а саме (рис.17):

- в зону подачі жомопресової води дифузійних установок 5, 6 з ємкості 1;
- в очищений після пульпоуловлювачів 15 дифузійний сік перед його подачею на переддефекатор 23 з ємкості 2;
- в жомопресову воду після глибокого пресування жому на пресах 18 перед збірником жомопресової води 21 з ємкості 2.

Одержаний дифузійний сік після пульпоуловлювачів 15 очищували за типовою схемою, яка включала прогресивну попередню дефекацію та холодно-гарячу основну дефекацію, I та II сатурацію з фільтруванням на патронних і рамних фільтрах, сульфитацію очищеного соку. Показано, що впровадження цієї технології на ТОВ «Наркевицький цукровий завод» дозволила збільшити вміст СР у пресованому жомі на 4,4 %, знизити каламутність соку I -ї сатурації, сульфітованого соку, цукру та витрати природного газу на сушіння пресованого жому, відповідно, на 45,3 %, 26,8 %, 8,7 % та 0,78 м<sup>3</sup>/т.буряку. Показано, що використання цієї технології дозволяє отримувати, порівняно з заводською, збагачений біогеними металами *Mg* та *Mn* порошок сироватки з однорідними за розміром дисперсними частинками зі зниженим індексом розчинності та показником вологості, відповідно, в 2,5 рази та на 35 %, з подовженим терміном його зберігання з 20 до 28 місяців.

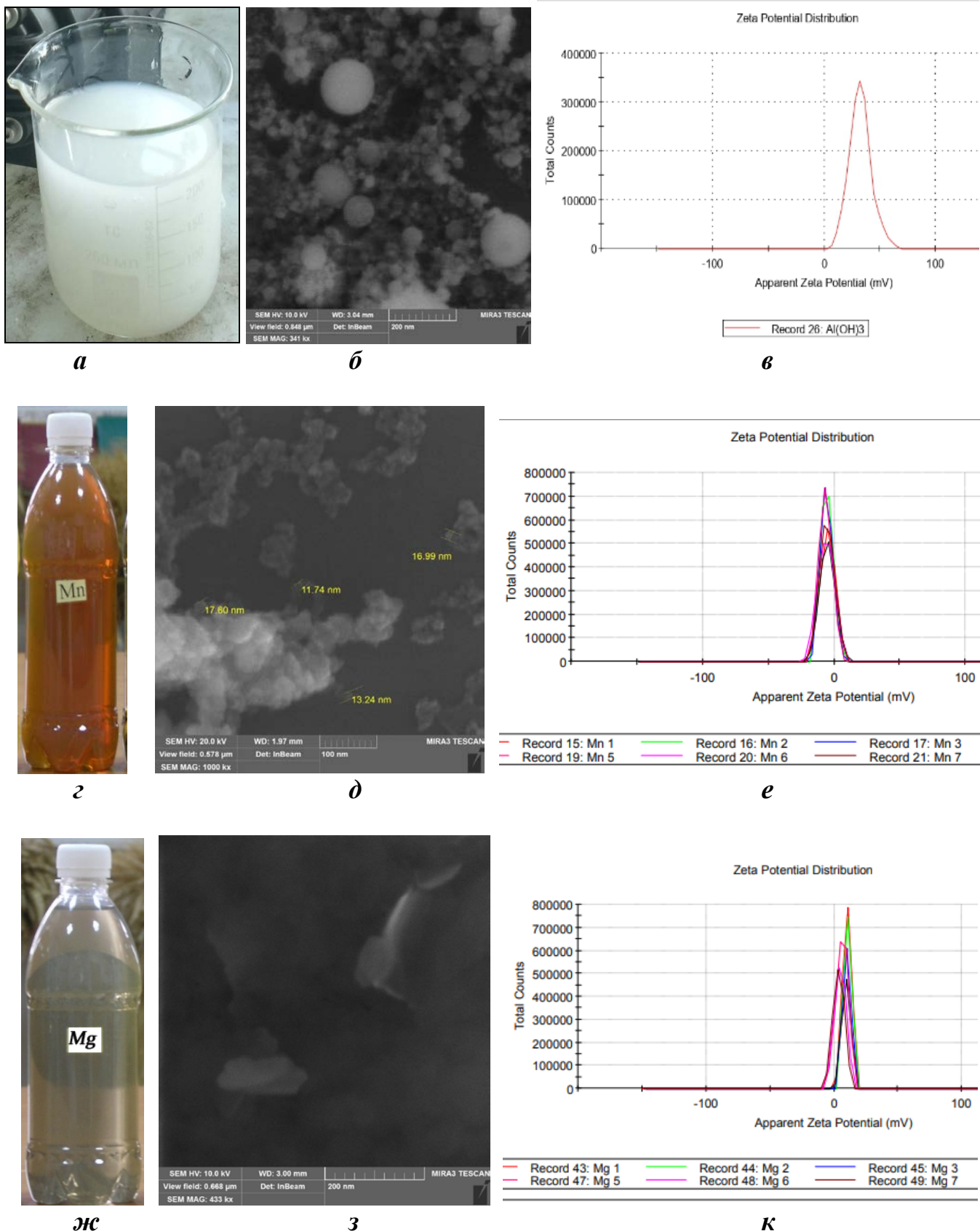
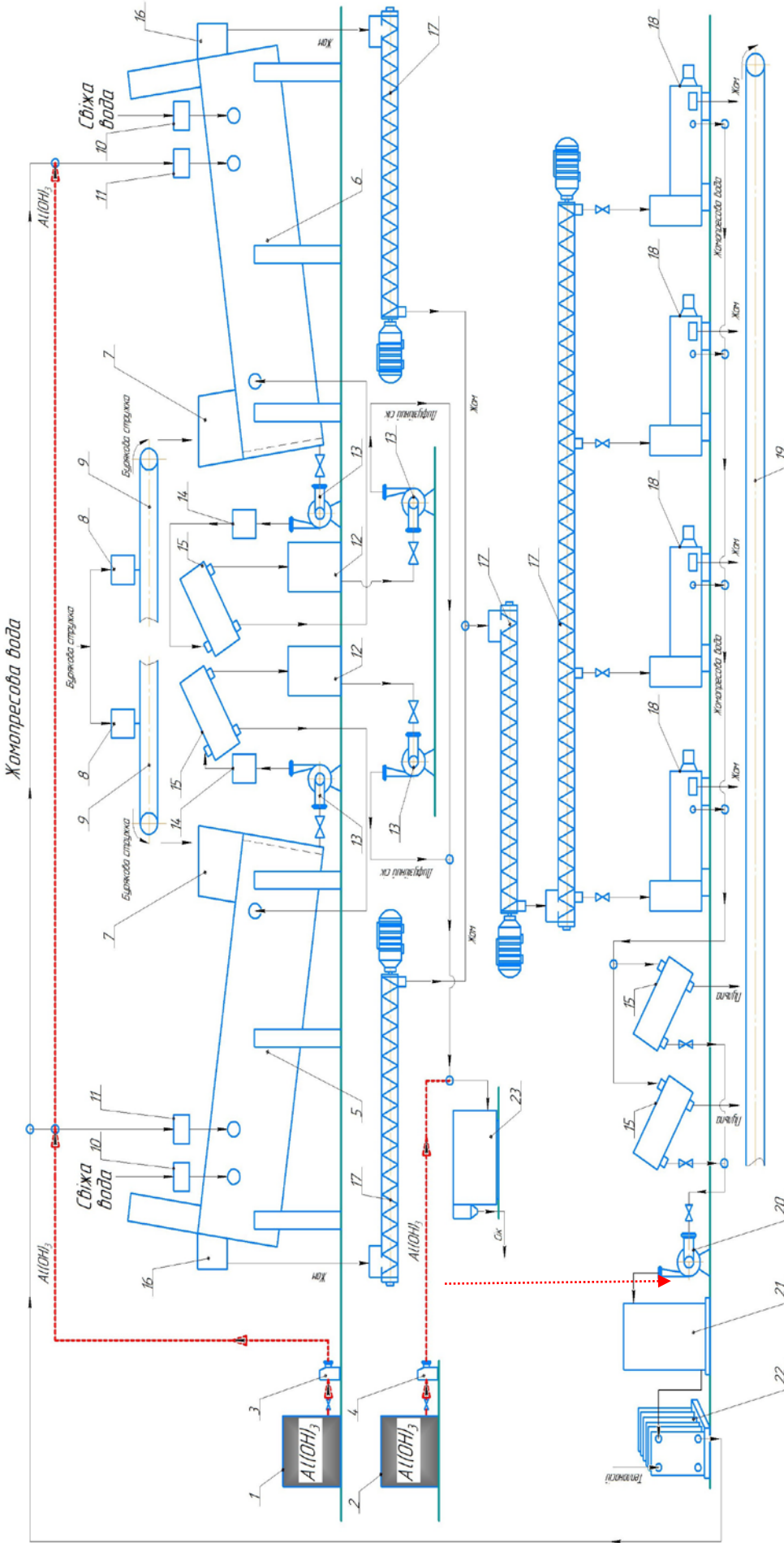


Рисунок 16 - Наночастинки металів, одержані на електротехнічному комплексі:  
**а, г, ж** – відповідно, зовнішній вигляд наночастинок *Ag*, *Mn* та *Mg*;  
**б, д, з** – відповідно, ТЕМ зображення наночастинок *Ag*, *Mn* та *Mg*; **в, е, к** –  
відповідно, графік розподілення  $\zeta$  – потенціалу наночастинок *Ag*, *Mn* та *Mg* методом  
електрофореза



1 - Емкості  $\text{Al(OH)}_3$ ; 3, 4 - насоси-дозатори; 5 - дифузійний апарат; 6 - засисний апарат; 7 - засисний апарат; 7 - засисний апарат; 8 - засисний апарат; 9 - засисний апарат; 10 - засисний апарат; 11 - засисний апарат; 12 - засисний апарат; 13 - засисний апарат; 14 - засисний апарат; 15 - засисний апарат; 16 - засисний апарат; 17 - засисний апарат; 18 - засисний апарат; 19 - засисний апарат; 20 - засисний апарат; 21 - засисний апарат; 22 - засисний апарат; 23 - засисний апарат.

Рисунок 17 - Апаратурно-технологічна схема процесу екстрагування та очистки сахарози з бурякової стружки з застосуванням ГОАЕС

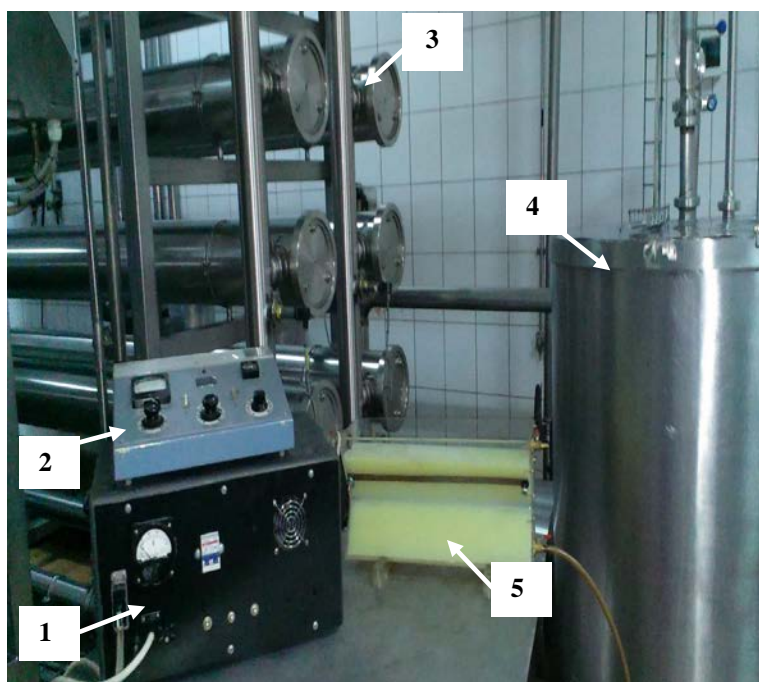


Рисунок 18 - Загальний вигляд електроіскрової установки одержання наночастинок  $Mg$  і  $Mn$ : 1 – генератор розрядних імпульсів; 2 – пульт керування; 3 – нанофільтраційна установка; 4 – ємкість з продуктом; 5 - розрядна камера

Обґрунтовано та апробовано в умовах хлібопекарського підприємства ПП «Міллівіль» (м. Київ) ефективність використання інноваційної технології біогенних металів  $Mg$  і  $Mn$  електроіскрового способу та преміксу «Наномікроент» в процесі одержання хлібобулочних виробів. Ця технологія передбачає дозування таких добавок на стадії приготування та замішування хлібопекарського тіста.

Обґрунтовано та апробовано в умовах АТ «Пирятинський сирзавод» (Полтавська обл.) ефективність використання інноваційних технологій одержання біогенних металів  $Mg$  і  $Mn$  електроіскрового способу та їхнє використання в процесі мінералізації підсирної сироватки (рис. 18, рис. 19).

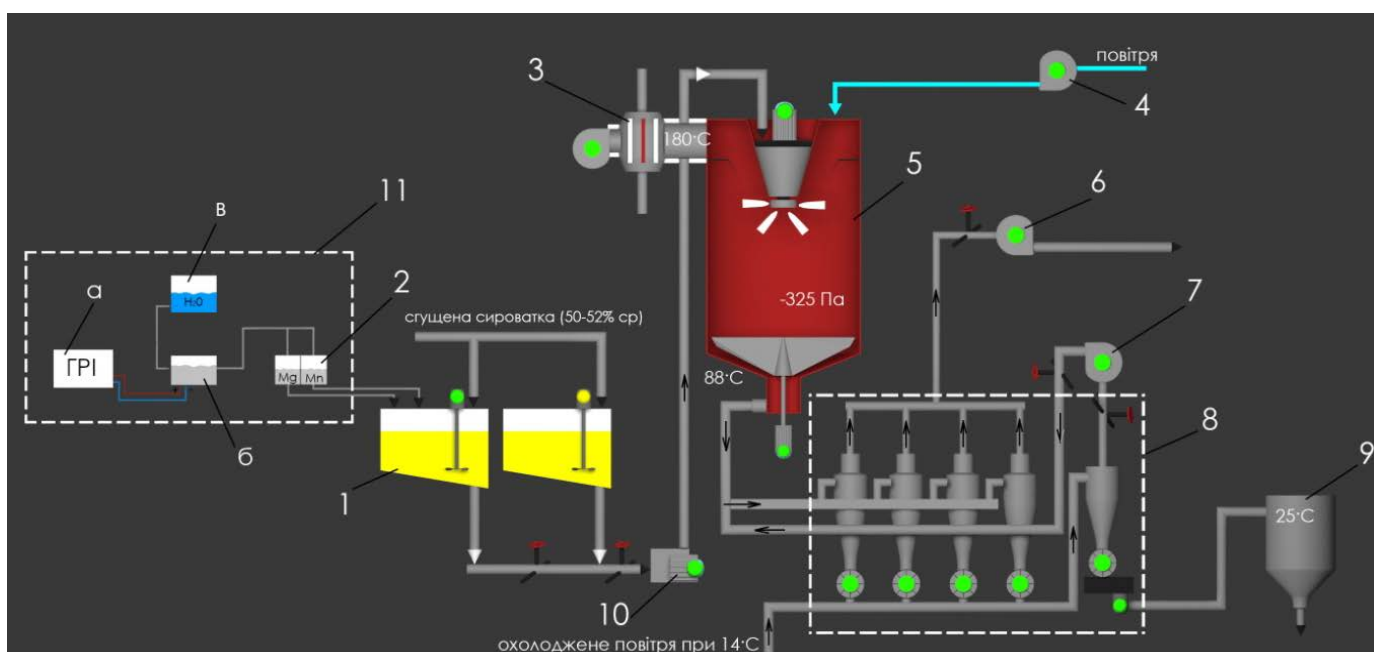


Рисунок 19 - Дисплейна мнемодіаграма процесу сушіння молочної сироватки з додаванням наночастинок металів  $Mg$  і  $Mn$  електроіскрового способу: 1 – ємкість для сироватки; 3 – теплогенератор; 5 – дискова розпилювальна сушарка; 8 – система циклонів сухої сироватки; 9 – бункер сухої сироватки; 11 - електротехнічний комплекс одержання наночастинок металів



Ця технологія передбачає дозування біогенних металів *Mg* і *Mn*, одержаних на електротехнічному комплексі *11* на стадії механічного перемішування маси підзгущеної сироватки в ємкості *1* з наступним її сушінням на розпилювальній сушарці *5*.

Показано, що використання цієї технології дозволяє отримувати порівняно з заводською, хлібобулочні вироби зі збільшеним питомим об'ємом і пористістю, відповідно, на 7,6 % та 13,8 %. При цьому знижується дозування солі *NaCl*, а також підвищується вміст мінеральних речовин, а саме - кальцію на 6,7 %, фосфору – на 3,9 %, калію – на 4,8 %, магнію – на 18 % та заліза – на 86,7 %.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вперше запропоновано нове вирішення наукової проблеми, що полягає у використанні наноматеріалів із структуро- та агрегатоутворюючими властивостями для інтенсифікації процесів екстрагування, пресування, очищення та мікронутрієнтного збагачення харчових продуктів. У результаті проведених досліджень сформульовано такі висновки та рекомендації:

1. Обґрунтовано доцільність застосування наноматеріалів у процесах структуро- та агрегатоутворення в багатокомпонентних гетерогенних дисперсних системах. Одержана залежність кінетики агрегації частинок у багатофазних дисперсних системах від їхньої дисперсності та об'ємної концентрації поверхневої енергії (енергії Гіббса). Підтверджено, що дисперсність твердої фази частинок – один із основних критеріїв, що визначає умови проведення цих процесів, а підвищення дисперсності – один із основних шляхів їхньої інтенсифікації.

2. Проведено математичне моделювання динаміки одночасного турбулентного та броунівського масоперенесення на процес «швидкої коагуляції» та запропоновано механізм впливу наночастинок на їхню агрегатоутворюючу здатність у дисперсних системах. Визначено граничний розмір частинок для прогнозування початку агрегування та утворення в дисперсній системі просторових структур залежно від сил взаємодії між частинками. Розроблені рівняння для швидкості дисипації кінетичної енергії в суспензії дають можливість визначити дисперсність частинок, за яких у механізмі коагуляції переважає броунівська дифузія частинок, що забезпечує кінетичну стійкість утворених коагуляційних структур.

3. Встановлено закономірності зміни фізико-хімічних та електроповерхневих властивостей наночастинок металів *Al*, *Mg*, *Mn*, *Ag* та нанокомпозитів за використання різних способів їхнього одержання, що дає можливість коригувати протікання процесів агрегато- та структуроутворення в харчових системах. Встановлена *in vitro* відповідність одержаних наночастинок металів *Al*, *Mg*, *Mn* та *Ag*, отриманих електроіскровим способом на вдосконаленій електророзрядній установці та розробленого нанопреміксу «Наномікроент» регламентованим значенням безпечності.

4. Встановлено, що наночастинок *Al*, отримані електроіскровим способом, порівняно з іншими дисперсними системами (гіпс, сульфат алюмінію, гель алюмінію, який отримано електронно-променевим способом) характеризуються вищими комплексоутворюючими властивостями. Експериментально підтверджено здатність наночастинок *Al* до утворення нерозчинних комплексів із негативно

зарядженими високомолекулярними сполуками, що пов'язано з нанорозмірністю їхньою твердої фази (1 - 30 нм), хімічною чистотою (вміст  $Al(OH)_3$  – 96,0 %) та позитивним електрокінетичним поверхневим зарядом (+ 32,3 мВ).

5. Підтверджено технологічну доцільність застосування наночастинок  $Al$ , отриманих електроіскровим способом для покращання процесу вилучення цукрози з бурякової стружки та рафінації олії від фосфатидів. Експериментально підтверджено взаємозв'язок між коефіцієнтом дифузії внутрішнього масоперенесення молекул сахарози в мікроканалах провідної тканини бурякової стружки та електрохімічним насиченням її колоїдно-пектинового комплексу іонами алюмінію. Встановлено при цьому підвищення тургору стружки, що сприяє в подальшому ефективному відділенню води на жомових пресах, а також підвищенню ефектів очищення дифузійного соку як в процесі екстрагування, так і на наступних етапах вапняно-карбонатного очищення за рахунок коагуляції високомолекулярних сполук (в першу чергу білково-пектинового комплексу) та утворенню компактних і мало гідратованих осадів в умовах попередньої дефекації та I карбонізації.

6. Визначено узагальнені критерії оптимізації, в результаті чого встановлено ефективне значення наночастинок  $Al$ , отриманих електроіскровим способом, а саме - 0,0028 % до к.б. в процесі екстрагування сахарози та 0,00325 % до к.с. у процесі очищення дифузійного соку, в результаті чого підвищується вміст сухих речовин у віджатому жомі на 3,0 %, знижується каламутність фільтрованого соку I сатурації на 198 од. ICUMSA. Експериментально підтверджено взаємозв'язок між показниками сорбції та десорбції хліба, активності води хліба та сухої сироватки з структуроутворюючими властивостями наночастинок  $Mg$  і  $Mn$ , отриманих електроіскровим способом і нанопреміксу «Наномікроєнт». Встановлено здатність наночастинок  $Mg$  до комплексоутворення з білково-вуглеводними речовинами, в результаті чого спостерігалось відбілювання м'якушки хліба та зниження забарвленості порошку сироватки з світло-жовто-білого до білого, як в процесі сушіння, так і під час зберігання.

7. Встановлено, що застосування наночастинок  $Mg$  і  $Mn$ , отриманих електроіскровим способом, сприяє отриманню однорідності дисперсних фаз порошку сироватки в межах 10 - 100 мкм, за рахунок чого збільшується його питома поверхня на 9,4 %, знижується індекс розчинності та активності води, відповідно, на 67 та 39 %, знижується величина вологості на 35 %, збільшується вміст  $Mg$  та  $Mn$ , відповідно, в 7 та 12 разів та подовжується термін зберігання з 20 до 28 місяців.

8. Розроблено та впроваджено електроіскрову технологію одержання наночастинок металів  $Al$ ,  $Mg$ ,  $Mn$  та  $Ag$  та нанопреміксу «Наномікроєнт» в процесі екстрагування цукрози з бурякової стружки та очищення дифузійного соку, мікронутрієнтного збагачення сухої молочної сироватки та хлібобулочних виробів. Підтверджено технічну можливість одержання помірно-стійких нанодисперсних систем з розмірністю частинок  $Al$  10 - 80 нм,  $Mg$  - 30 - 110 нм і  $Mn$  - 10 - 40 нм. При цьому  $\zeta$ -потенціал наночастинок  $Al$  плюс 32,3 мВ,  $Mg$  – плюс 10,3 мВ і  $Mn$  - мінус 5,07 мВ. Розроблено нормативні документи на виробництво наночастинок  $Al$  ТУ У 20.1-2799900706-001:2020 «Коагулянт «Алюкол» (алюміній колоїдний), на застосування коагулянту «Алюкол» (висновок № 12.2-18-1/24882 санітарно-епідеміологічної експертизи державної служби України з питань

безпеки харчових продуктів та захисту споживачів). Новизну технічних рішень захищено трьома патентами на винахід України.

Економічна ефективність застосування наночастинок Al, отриманих електроіскровим способом, у технології дифузійно-пресового екстрагування сахарози з бурякової стружки досягається за рахунок покращання технологічних показників бурякоцукрового виробництва та зниження енергетичних витрат на сушіння пресованого жому. Сумарний прогнозований економічний ефект від впровадження результатів роботи становить 2572,931 тис. грн.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 72 наукові праці, у тому числі: 39 статей, з них: 6 - у наукометричній базі SCOPUS, 1 - у наукометричній базі Web of Science, 11 – у закордонних наукових виданнях, 21 – у наукових фахових виданнях України, 27 тез доповідей та матеріалів конференцій, 3 патенти України на винахід та 3 – на корисну модель.

### Статті в міжнародних наукових журналах

1. 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.

2. Olisheskiy V., Koretska I., Marynin A., Zakharevich V., Marchenko A. Nanoemulsion usage in the production of bakery products. *Scientific works of University of food technologie*. 2013. Vol. LX. P. 97–100.

3. Маринин А. И., Олишевский В. В. Влияние электрогидравлической обработки на сокоотружечную смесь сахарной свеклы. *Электронная обработка материалов*. 2013. № 5, Т. 49. С. 109–113.

4. Лопатько К. Г., Олишевский В. В., Маринин А. И., Афтандиянц Е. Г. Образование наноразмерной фракции металлов при электроискровой обработке гранул. *Электронная обработка материалов*. 2013. № 6, Т. 49. С. 80-85.

5. Олишевский В., Маринин А., Пушанко Н., Захаревич В., Ляпина К. О влиянии соединений алюминия в наноформе на стабильность систем содержащих сахарозу. *Scientific works of University of food technologie*. 2014. Vol. LXI, Part 1. P. 308–310.

6. Gun'ko V.M., Andriyko L.S., Zarko V. I., Olisheskiy V.V., Marynin A.I., Janusz W. Effects of dissolved metal chlorides on the behavior of silica nanoparticles in aqueous media. *Central European Journal of Chemistry*. 2014. Vol. 12, Issue 4. P. 480–491. (**SCOPUS**).

7. Andriyko L.S., Zarko V.I., Gun'ko V.M., Marynin A.I., Olisheskiy V.V. , Skwarek E. , Janusz W. Electrical and physical characteristics of silica nanoparticles in aqueous media affected by cations Na<sup>+</sup>, Ba<sup>2+</sup> and Al<sup>3+</sup>. *Adsorption Science and Technology*. 2015. Vol. 33, Issue 6. P. 601–607. (**SCOPUS**).

8. Кочубей-Литвиненко О. В., Билык Е. А., Олишевский В. В., Маринин А. И., Лопатько К. Г. Способ обогащения молочной сыворотки коллоидными частицами биогенных металлов Mg и Mn, перспективы ее использования. *Пищевая промышленность: наука и технологии*. 2015. № 3, Т. 29. С. 36–41.



9. Ляпина К. В., Дульнев П. Г., Маринин А. И., Устинов А. И., Мельниченко Т. В., Олишевский В. В. Получение коллоидных растворов высокой вязкости (геля) на основе инкапсулированных металлических наночастиц. *Электронная обработка материалов*. 2016. № 52, Т. 6. С. 55–58.

10. Олішевський В. В., Українець А. І., Пушанко Н. Н., Бабко Е. Н., Маринин А. И., Никитюк Т. В., Лопатько К. Г., Лапшин С. А. Использование наночастиц алюминия при экстрагировании сахарозы из свеклы. *Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: сборник статей III Международной научно-практической конференции*. Минск : БГАТУ, 2017. С. 377–379.

11. Олишевский В. В., Хомичак Л. М., Бабко Е. Н., Лопатько К. Г., Бабко Д. Е. Анализ применения алюминий- и кальцийсодержащих реагентов в технологическом процессе свеклосахарного производства. *Saxar*. 2020. № 4. С. 16–20.

12. Хомичак Л. М., Олишевский В. В., Бабко Е. Н., Лопатько К. Г. Результаты практической реализации применения наноразмерного гидроксида алюминия в условиях сахарных заводов Украины. *Saxar*. 2020. № 5. С. 18–22.

13. Олишевский В. В., Хомичак Л. М., Бабко Е. Н., Лементар С. Ю. Оптимальные параметры процесса экстрагирования сахарозы с применением наноразмерного гидроксида алюминия. *Saxar*. 2020. № 8. С. 15–19.

#### **Статті у наукових фахових виданнях України**

14. Пирог Т. П., Конон А. Д., Антонюк С. І., Олішевський В. В., Маринін А. І. Дія наночастинок металів на деякі мікроорганізми і мікрофлору нефільтрованого пива. *Мікробіологічний журнал*. 2011. № 6, Т. 73. С. 12–19. (*SCOPUS*).

15. Олішевський В. В., Маринін А. І., Дашковський Ю. О., Ткаченко С. В., Щербаков О. Б. Антимікробний вплив препаратів наночастинок металів на мікрофлору харчових продуктів. *Ukrainica Bioorganica Acta*. 2011. № 1, Т. 9. С. 46–52.

16. Олішевський В. В., Лопатько К. Г., Дашковський Ю. О., Афтанділянц Є. Г., Маринін А. І., Захарченко С. М., Білера Н. М., Ткаченко С. В., Гончар О. М., Житнецький І. В. Дослідження структури і біологічної активності водних розчинів наночастинок металів. *Ukrainica Bioorganica Acta*. 2011. № 2, Т. 9. С. 29–37.

17. Karvan S., Paraska O., Marynin A., Olisheskiy V. Application of nanodispersions of silicon dioxide for treatment of textile materials. *Fiber Research for Tomorrow's Applications : 2012 Spring Conference of the Fiber Society, 23–25 May 2012. Switzerland, 2012. P. 110–112. (SCOPUS)*.

18. Олішевський В. В., Верченко Л. М., Маринін А. І., Ардинський О. В., Ткаченко С. В. Новації в підході до очищення дифузійного соку в цукровому виробництві. *Наукові праці НУХТ*. 2012. № 43. С. 78–82.

19. Олішевський В. В., Маринін А. І., Носенко Т. Т., Дроков В. Г., Ткаченко С. В. Видалення супутніх речовин із рослинних олій з використанням наночастинок оксиду алюмінію. *Харчова промисловість*. 2012. № 12. С. 242–246.

20. Ткаченко С. В., Олішевський В. В., Верченко Л. М., Маринін А. І., Ардинський О. В. Нанотехнології в цукровій промисловості. *Науковий вісник НУБіП*. Серія : техніка та енергетика АПК. 2012. Вип. 170., Ч. 1. С. 360–365.

21. Лопатько К. Г., Афтанділянц Є. Г., Мирончук В. Г., Олішевський В. В., Маринін А. І., Гончар О. М. Вивчення бактерицидної дії колоїдних частинок срібла отриманих електроіскровим методом. *Наукові праці ОДАХТ*. 2013. Вип. 43. С. 151–154.
22. Олішевський В. В., Лопатько К. Г., Маринін А. І., Афтанділянц Є. Г., Журавков О. В. Використання продуктів об'ємного електроіскрового диспергування струмопровідного шару гранул алюмінію для очистки клітинного соку цукрового буряка. *Промышленная теплотехника*. 2013. № 7, Т. 35. С. 204–209.
23. Корчак Г. І., Сурмашева О. В., Романенко Л. І., Маринін А. І., Олішевський В. В., Марченко А. Б. Адсорбційна активність каоліну (мікробіологічні дослідження). *Environment & Health*. 2014. № 4. С. 37–41.
24. Myronenko L., Krychkovska L., Olishevskiy V., Marynin A. Influence of carbon-bearing raw material on microfungus *Blakeslea Trispora* biomass producing. *Ukrainian Food Journal*. 2014. Vol. 3, Issue 3. P. 422–428.
25. Andriyko L., Zarko V., Marynin A., Olishevskiy V., Kravchenko A., Demjanenko E. Zeta Potential and Degree of the Aggregation of Nanoparticles of the Pyrogenic Silica in the Presence of the Dissolved Metal Chlorides in the Aqueous Medium. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*. 2015. Vol. 13, Issue 3. P. 389–402. (**SCOPUS**).
26. Олішевський В. В., Маринін А. І., Білик О. А., Васильченко Т. О. Комплексне збагачення хлібобулочних виробів мінеральними речовинами. *Хранение и переработка зерна*. 2015. № 2, Т. 191. С. 48–51.
27. Маринин А. И., Олишевский В. В., Зарко В. И., Лопатько К. Г. Синтез наноразмерного гидроксида алюминия методом объемного электроискрового диспергирования. *Поверхность : сборник научных трудов*. 2015. № 7. С. 205–212.
28. Петрик І. С., Єременко А. М., Смирнова Н. П., Маринін А. І., Олішевський В. В. Особливості стабілізації наночастинок міді та срібла цистеїном у водних колоїдних розчинах. *Хімія, фізика та технологія поверхні*. 2015. № 3, Т. 6. С. 364–371.
29. Liapina K., Dulnev P., Marynin A., Pushanko N., Olishevskiy V. The lime purification of sugar-containing solution using high viscosity colloidal solutions. *Biotechnologia Acta*. 2015. Vol. 8, Issue 6. P. 71–76.
30. Олішевський В. В. Збагачення хлібобулочних виробів біогенними мінеральними речовинами. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2015. № 3 (23), Т. 3. С. 55–59.
31. Українець А. І., Олішевський В. В., Пушанко Н. М., Ляпіна К. В., Маринін А. І. Коагуляційне очищення жомопресової води гелем алюмінію. *Наукові праці НУХТ*. 2015. № 5, Т. 21. С. 237–243.
32. Liapina K., Marynin A., Dulnev P., Olishevskiy V., Pushanko N. Effect of Aluminum-Based Colloid Solutions on Purification of Products of Sugar Production. *Springer Proceedings in Physics*. 2016. Vol. 183. P. 343–354. (**SCOPUS**).
33. Олішевський В. В., Українець А. І., Лопатько К. Г., Пушанко Н. М., Бабко Є. М., Вільченко А. М., Костюченко В. В., Маринін А. І., Никитюк Т. В., Лапшин С. О. Досвід використання нанокompозиту алюмінію в умовах бурякоцукрового виробництва. *Цукор України*. 2016. № 11–12 (131–132). С. 11–16.

34. Олішевський В. В., Українець А. І., Бабко Є. М., Пушанко Н. М., Никитюк Т. В., Закордонець Д. І., Бартошак І. В. Вплив нанокompозиту алюмінію на дифузійні властивості бурякової стружки. *Цукор України*. 2017. № 5 (137). С. 17–23.

35. Прокопюк О. М., Никитюк Т. В., Олішевський В. В., Бабко Є. М. Дослідження впливу на вологоутримуючу здатність бурякового жому додаткових реагентів застосовуваних в процесі екстрагування сахарози. *Цукор України*. 2018. № 2 (144). С. 6–9.

36. Жильцов А. В., Коробський В. В., Лапшин С. О., Олішевський В. В. Використання електротехнічного комплексу для отримання нано- і мікропорошків металів. *Науковий вісник НУБіП України*. Серія : Техніка та енергетика АПК. 2018. № 268. С. 189–196.

37. Nykytiuk T., Olishivskiy V., Babko E., Prokopiuk O. Impact of nanosized aluminum hydroxide on the structural and mechanical properties of sugar beet tissue. *Ukrainian Food Journal*. 2018. Vol. 7., Issue 3. P. 488–498. (**Web of Science**).

38. Олішевський В. В., Бабко Є. М., Пушанко Н. М., Українець А. І., Бабко Д. Є. Передова технологія використання гідроксиду алюмінію на цукрових заводах України. *Харчова промисловість*. 2020. № 27. С. 88–94.

39. Olishivskiy V., Vasylenko S., Babko E., Lementar S. Simulation of nanoparticle aggregation process in heterogeneous dispersed systems. *Ukrainian Journal of Food Science*. 2020. Vol. 8., Issue 1. P. 95–104.

#### **Матеріали та тези наукових конференцій**

40. Олішевський В. В., Маринін А. І., Носенко Т. Т., Дрокол В. Г., Ткаченко С. В. Вплив оксиду алюмінію в нанорозмірному стані на ступінь видалення фосфатів з рослинної олії. *Стратегія якості в промисленості і освіті* : матеріали VIII міжнародної конференції, 8–15 июня 2012 г. Варна. *Acta Universitat is Pontica Euxinus*. 2012. Т. III. Спеціальний випуск. С. 139–141.

41. Olishivskiy V., Koretska I., Marynin A., Zakharevich V., Marchenko A. Nanoemulsion usage in the production of bakery products. *Food science, engineering and technologies 2013 : scientific works*. 2013. Vol. LX. P. 97–100.

42. Олішевський В. В., Корецкая И. Л., Сурмашева Е. В. Разработка нанобиоэмульсий с использованием каолиновых препаратов для пищевых технологий. *Пищевые инновации и технологии* : материалы конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 15-16 апреля 2013. Кемерово : КемТИПП, 2013. С. 457–461.

43. Олішевський В. В., Маринін А. І., Захаревич В. Б., Лопатько К. Г., Афтанділянц Є. Г., Кричковська Л. В. Використання наночастинок металів у цукровій промисловості. *Хімія, біо- і нанотехнології, екологія і економіка в харчовій і косметичній промисленості* : матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 10–13 июня 2013 г. Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. С. 27–29.

44. Лопатько К. Г., Афтанділянц Є. Г., Щербакова О. М., Куницький В. А., Трач В. В., Таран Н. Ю., Сергиенко Р. А., Олішевський В. В., Маринін А. І., Захаревич В. Б. Використання колоїдної форми металів у біології та медицині. *Хімія, біо- і нанотехнології, екологія і економіка в харчовій і косметичній*

*промышленности* : материалы международной научно-практической конференции, 8–10 декабря 2014 г. Харьков : НТУ «ХПИ», 2014. С. 91–95.

45. Олишевский В. В., Маринин А. И., Пушанко Н. М., Захаревич В. Б., Ляпина К. В. О влиянии соединений алюминия в наноформе на стабильность систем содержащих сахарозу. *Food science, engineering and technologie*. 2014. Vol. LXI, Part I. P. 308–310.

46. Кочубей-Литвиненко О. В., Билык Е. А., Олишевский В. В., Маринин А. И., Лопатько К. Г. Перспективы использования молочной сыворотки, обогащенной коллоидными частицами магния и марганца. *Innovative technologies for production of functional food* : International scientific-practical conference, April 2015, Kutaisi. 2015. P. 75–78.

47. Кочубей-Литвиненко О. В., Олішевський В. В., Білик О. А., Маринін А. І. Технологія сироватки, збагаченої колоїдними частинками Mg та Mn, і перспективи її використання. *Перспективи розвитку м'ясної, молочної та олієжирової галузей у контексті євроінтеграції* : матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, 24–25 березня 2015 р. Київ : НУХТ, 2015. С. 108–109.

48. Українець А. І., Олішевський В. В., Пушанко Н. М., Бабко Є. М., Никитюк Т. В. Розроблення ресурсозберігаючого процесу екстрагування сахарози з цукрового буряку з використанням нанокompозиту алюмінію. *Удосконалення процесів і обладнання - запорука інноваційного розвитку харчової промисловості* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 8–10 листопада 2016 р. Київ : НУХТ, 2016. С. 117–119.

49. Олішевський В., Українець А., Пушанко Н., Бабко Є., Маринін А., Никитюк Т., Лопатько К., Лапшин С. Досвід використання нанокompозиту алюмінію в умовах бурякоцукрового виробництва. *Перспективи розвитку цукрової промисловості України* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції цукровиків України, 29–30 березня 2017 р. Київ : НУХТ, 2017. С. 54–57.

50. Никитюк Т. В., Олішевський В. В., Українець А. І. Дослідження впливу реагентів на властивості бурякової стружки. *Новітні науково-технічні рішення в цукровій промисловості*: матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції, 15–19 травня 2017 р. Львів, 2017. С. 469–470.

51. Никитюк Т., Олішевський В., Бабко Є., Прокопюк О. Вплив додаткових реагентів на вологостійкість здатність бурякового жому. *Перспективи розвитку цукрової промисловості України* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції цукровиків України, 27–28 березня 2018 р. Київ : НУХТ, 2018. С. 116–118.

52. Никитюк Т., Олішевський В., Бабко Є. Методика визначення структурно-механічних властивостей тканини цукрового буряка. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті* : матеріали 84-ї Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 23–24 квітня 2018 р. Київ : НУХТ, 2018. Ч. 2. С. 114.

53. Никитюк Т., Олішевський В., Бабко Є., Бабко Д. Вплив нанорозмірного гідроксиду алюмінію на структурно-механічні властивості бурякової тканини. *Перспективи розвитку цукрової промисловості України* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції цукровиків України, 26–27 березня 2019 р. Київ :

НУХТ, 2019. С. 135-137.

54. Кіріяченко В.О., Буйноза І.В., Бабко Є.М., Олішевський В.В. Інтенсифікація способу підготовки екстрагенту для вилучення сахарози з бурякової стружки. *Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті євроінтеграції* : матеріали 8 Міжнародної науково-практичної конференції, 5–6 листопада 2019 р. Київ : НУХТ, 2019. С. 81–83.

55. Ткаченко С. В., Носенко Т. Т., Маринін А. І., Олішевський В. В. Використання наночастинок оксиду алюмінію для очищення рослинної олії від фосфатидів. *Технічні науки: стан, досягнення і перспективи розвитку м'ясної, олієжирової та молочної галузей виробництва* : тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, 22–23 березня 2012 р. Київ : НУХТ, 2012. С. 102–103.

56. Олішевський В. В., Верченко Л. М., Маринін А. І., Ткаченко С. В., Ардинський О. В., Никитюк Т. В. Застосування наночастинок гідроксиду алюмінію для очищення дифузійного соку на стадіях попереднього та основного вапнування. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті* : тези доповідей 78-ї Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 2–3 квітня 2012 р. Київ : НУХТ, 2012. Ч. 2. С. 71–72.

57. Мартинюк В. І., Олішевський В. В. Нанорозмірні частинки в цукровій промисловості. *Науково-технічна творчість студентів з процесів і обладнання харчових виробництв* : збірник тез Міжнародної студентської науково-практичної конференції 25-26 жовтня 2012 р. Донецьк : ДонНУЕТ, 2012. Вип. 4. С. 42–44.

58. Olishevskiy V., Drovkov V., Nosenko T., Marinin A. Removal of phospholipids from vegetable oil using of aluminium oxidenanoparticles. *Congress NEEFood – 2013 : the second north and east european congress on food, May 26-29, 2013*. Kyiv : NUFT, 2013. P. 201.

59. Пушанко Н. М., Олішевський В. В., Маринін А. І., Захаревич В. Б. Дослідження ефективності очисної дії реагентів в нанорозмірному стані в процесі попередньої дефекації дифузійного соку. *Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти харчовій промисловості* : тези доповідей Міжнародної наукової конференції присвяченої 130-річчю НУХТ, 13-16 жовтня 2014 р. Київ : НУХТ, 2014. С. 140.

60. Українець А. І., Олішевський В. В., Маринін А. І., Никитюк Т. В. Нові підходи в збагаченні хлібобулочних виробів мінеральними речовинами. *Харчові технології, хлібопродукти і комбікорми* : збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції 2015 р. Одеса : ОНАХТ, 2015. С. 28–29.

61. Olishevsky V., Nykytiuk T. New aluminum composite membranes for water purification. *Membrane and Sorption processes and technologie* : proceedings of the 2nd Ukrainian-Polish scientific conference, 2–4 December, 2015. Kyiv : NaUKMA, 2015. P. 153–155.

62. Петрик І. С., Єременко А. М., Смірнова Н. П., Маринін А. І., Олішевський В. В., Сурмашева О. В., Корчак Г. І., Романенко Л. І. Одержання та стабілізація біосумісних наночастинок міді та срібла *Наноструктуровані біосумісні / біоактивні матеріали* : тези доповідей всеукраїнської конференції з міжнародною участю, присвяченої 85-річчю з дня народження академіка НАН України О. О. Чуйка, 13-15 травня 2015 р. Київ : 2015. С. 240.

63. Ukrainets A., Olishevsky V., Nykytiuk T. Research antibacterial properties of ultramicrodispersed systems. *Food Science for Well-being* : proceedings of the 8<sup>th</sup> Central European Congress on Food 2016, 23-26 May 2016. Kyiv: NUFT, 2016. P. 225.

64. Українець А. І., Олішевський В. В., Пушанко Н. М., Маринін А. І., Бабко Є. М., Никитюк Т. В. Інтенсифікація процесу екстрагування сахарози з цукрового буряку з використанням наноконструкції. *Харчові технології, хлібопродукти і комбікорми* : збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції. Одеса : ОНАХТ, 2016. С. 35–37.

65. Олішевський В. В., Бабко Є. М., Никитюк Т. В. Застосування наноконструкції алюмінію в процесі екстрагування сахарози із бурякової стружки. *Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті Євроінтеграції* : тези матеріалів міжнародної науково-технічної конференції, 7–8 листопада 2017 р. Київ : НУХТ, 2017. С. 79–80.

66. Розумний О., Олішевський В., Бабко Є. Інтенсифікація процесу очищення жомопресованої води для екстрагування сахарози з цукрового буряка. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті* : тези 86-ї міжнародної наукової конференції, 2–3 квітня 2020 р. Київ : НУХТ, 2020. Ч. 2. С. 74.

#### Патенти України

67. Спосіб очищення дифузійного соку : патент 104338 Україна. № а201204314 ; заявл. 06.04.2012 ; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 2. 3 с.

68. Спосіб екстрагування сахарози з бурякової стружки : патент 114866 Україна. № а201606321 ; заявл. 10.06.2016 ; опубл. 10.08.2017, Бюл. № 15. 2 с.

69. Спосіб знезараження жомопресованої води для дифузійного процесу : патент 117938 Україна. № а201606507 ; заявл. 14.06.2016 ; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. 2 с.

70. Препарат білої глини «Кремневіт»: пат. на корисну модель 88967 України : МПК А61К 31/695. / А.Б.Марченко, О.В.Сурмашева, Г.І.Корчак, А.І.Міхійєнкова, А.І.Маринін, В.В.Олішевський. № u201311893; заявл. 09.10.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл №7. 2 с.

71. Дифузійно-пресовий спосіб екстрагування сахарози з бурякової стружки: пат. на корисну модель 130279 Україна. № u201809184 ; заявл. 06.09.2018 ; опубл. 26.11.2018, Бюл. № 22. 2 с.

72. Пристрій для отримання колоїду металу: пат. на корисну модель 130939 Україна. № u201809540 ; заявл. 21.09.2018 ; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24. 3 с.

**Особистий внесок здобувача в наукових роботах** – теоретичний аналіз літературних джерел, розроблення методології досліджень, написання та підготовка статті до публікації [1-4, 14-18, 31, 33-36, 41-43, 60-62]; систематизація завдань, керівництво та участь у проведенні досліджень, узагальненні результатів, участь у підготовці до друку [7-9, 11, 12, 23, 26-30, 37-40, 44-52, 53-59]; аналіз та узагальнення отриманих даних, підготовка до друку [5, 6, 10, 13, 19-22, 24, 25, 32, 63-67]; проведення патентно-інформаційних досліджень, апробація результатів у виробництво, їх узагальнення та підготовка матеріалів до патентування [68-72].



## АНОТАЦІЯ

**Олішевський В. В. Науково-технічні засади застосування наноматеріалів для інтенсифікації масообмінних процесів харчових виробництв. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 - процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. - Національний університет харчових технологій МОН України, м. Київ, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-практичної проблеми, що полягає у використанні наноматеріалів із структуро- та агрегатоутворюючими властивостями для інтенсифікації процесів екстрагування, пресування, очищення та мікронутрієнтного збагачення харчових продуктів.

Отримали подальший розвиток теоретичні уявлення процесу «швидкої коагуляції» частинок у багатофазних дисперсних системах. На основі результатів математичного моделювання кінетики агрегації частинок у багатофазних дисперсних системах визначено оптимальні діапазони параметрів (розмірність, електрокінетичний потенціал, концентрація частинок), за яких у технологічних системах харчових виробництв відбуваються процеси структуро- та агрегатоутворення. Запропоновано енерго- та ресурсоощадні технології переробки харчової сировини та виробництва харчових продуктів із використанням наночастинок і нанокompatитів. Результати досліджень впроваджені у виробництво на підприємствах цукрової, хлібопекарської та молочної промисловостей, а також у навчальному процесі Національного університету харчових технологій.

*Ключові слова:* наночастинки, дисперсні системи, структуроутворення, масообмінні процеси, екстрагування.

## ABSTRACT

**Olishevskiy V. Scientific and technical principles of application of nanomaterials for intensification of mass transfer processes of food production. - Manuscript.**

Thesis for a Doctor of Engineering Sciences degree by specialty 05.18.12 - Processes and the equipment of food, microbiological and pharmaceutical manufactures (technical sciences). - National University of Food Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

This dissertation is devoted to solving an important scientific and practical problem, which is to use nanomaterials with structure and aggregate - forming properties to intensify the processes of extraction, pressing, purification and micronutrient enrichment of food products.

Theoretically substantiated expediency of using nanodisperse systems to intensify the processes of structure and aggregation in heterogeneous systems, which is due to their development between the gas surface and the high volume concentration of surface energy (Gibbs energy). It is confirmed that the dispersion of the solid phase of particles is one of the main arteries that determines the conditions of these processes, as well as increased dispersion is one of the main ways of their intensification. The current state of

classification is analyzed, obtaining and researching methods of dispersed systems, the influence of dispersion on the change of their physicochemical substances is shown, electrokinetic and biological properties. The analysis of interphase interactions in multiphase dispersed systems allowed to determine the most effective technologies of their production and use for intensification of mass transfer processes and enrichment of food products with microelements. Mathematical modeling of the dynamics of simultaneous turbulent and Brownian transfer into the process is carried out «rapid coagulation» particles in multiphase dispersed systems. Based on the simulation results, the optimal ranges of parameters of the dispersed phases are determined (dimension, zeta potential, particle concentration) and the rate of scattering of the kinetic energy of turbulence, in which nanoparticles included in turbulent vortex motion improve the macroreological characteristics of structured dispersed systems.

In the framework of modeling the kinetics of particle aggregation, methods for obtaining nanomaterials are determined, namely the electric spark and the electron beam, which allow to obtain nanoparticles with structure and aggregating properties.

Optimization of the main physical and technological parameters of the discharge circuit of an underwater electrospark discharge in an aqueous medium under the conditions of *Al*, *Mg*, *Mn* nanoparticles with moderately stable kinetic and aggregate stability. Their physicochemical, electrosurface and biological properties have been studied, as well as a microelement premix has been developed. «Nanomicroent».

The expediency of using aluminum nanoparticles is proved, which are obtained by the electrospark method in the processes of sucrose extraction and purification, as well as processing of phosphatide oil. It was found that the heteropolarity, magnitude and sign of the charge of  $Al^{3+}$  ions enhance the reaction selective ability to negatively charged macromolecular compounds with the formation of insoluble complexes (primarily protein-pectin).

Application of thermochemical treatment of beet chips with aluminum nanoparticles, obtained by the electrospark method allows to increase the diffusion coefficient of the internal mass transfer of sucrose molecules in the microchannels of the conductive tissue of beet chips and turgor chips. Enhancement of the effects of purification of diffusion juice as in the extraction process, and in the subsequent stages of lime-carbonate purification and improvement of the process of dehydration of beet pulp. Rational technological parameters of juice extraction and purification processes are substantiated, increase of nutritional value and formation of quality indicators of bakery products and dry whey with the use of nanoparticles *Al*, *Mg*, *Mn*, which are obtained by electrospark method and nanocomposite premix «Nanomicroent». Energy and resource-saving technologies of food raw materials processing and food production with the use of nanoparticles and nanocomposites are offered.

The results of the research were used in the development of hardware-technological schemes and normative documents on the improvement of technologies of diffusion-press extraction of sucrose from beet chips, enrichment with trace elements of whey and bakery products, as well as in the educational process of the National University of Food Technologies.

*Keywords:* nanoparticles, dispersed systems, structure formation, mass transfer processes, extraction.







Підп. до друку 11.03.2021. Наклад 100 пр. Зам. № 1-21

---

НУХТ. 01601 Київ-33, вул. Володимирська, 68  
Свідоцтво про реєстрацію серія ДК № 1786 від 18.05.04 р.