

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ



ПОГРЕБНЯК АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 641.512+532.135

**НАУКОВО-ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ
ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ ВОДОПОЛІМЕРНИМ СТРУМЕНЕМ
ТА РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському державному університеті харчування та торгівлі Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Дейниченко Григорій Вікторович,
Харківський державний університет харчування та торгівлі, завідувач кафедри устаткування харчової і готельної індустрії ім. М.І. Беляєва.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ощипок Ігор Миколайович,
Львівський торговельно-економічний університет,
завідувач кафедри харчових технологій;

доктор технічних наук, професор
Паламарчук Ігор Павлович,
Національний університет біоресурсів
і природокористування України,
професор кафедри процесів і обладнання
переробки продукції АПК;

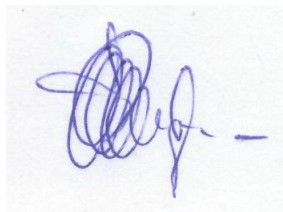
доктор технічних наук, професор
Осипенко Василь Іванович,
Черкаський державний технологічний університет,
завідувач кафедри проектування харчових
виробництв та верстатів нового покоління.

Захист дисертації відбудеться «26» червня 2018 р. об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.088.01 Харківського державного університету харчування та торгівлі за адресою: вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051.

Із дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського державного університету харчування та торгівлі за адресою: вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051.

Автореферат розіслано «25» травня 2018 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.М. Онищенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. ХХ століття збагатило людство багатьма великими відкриттями. Це зокрема різання струменем води, яке ще 25 років тому називали технологією майбутнього. Сьогодні ця технологія вже застосовується у багатьох галузях промисловості. Альтернативним інноваційним способом розрізання харчових продуктів (особливо за низьких температур) може стати процес гідрорізання.

Актуальність дисертаційного дослідження зумовлена необхідністю рішення однієї з найважливіших проблем розвитку харчової промисловості – впровадження універсального водополімерного різання в режимі 3D за умов ефективного використання енергетичних ресурсів. Нині для різання харчових продуктів використовують різноманітні механічні засоби та обладнання, які виконують розрізання лише в одній площині. Різальними органами цього обладнання є ротори, ножі гільйотин, дискові ножі, пили чи струни. Проте ці засоби та обладнання мають суттєві недоліки: серйозна небезпека при роботі з обладнанням; втрати продукту через налипання його на різальний орган; велика ширина розрізу та як наслідок значні втрати продукту; швидке затуплення і постійна потреба у заточуванні робочого органу, що стає причиною тривалого простою на технічне обслуговування; низька санітарна безпека; найчастіше нездоланні труднощі при розрізанні заморожених харчових продуктів, тощо.

Значний обсяг робіт стосовно дослідження розрізання та руйнування нехарчових матеріалів струменями води виконали Н. Франц, М. Хашиш, К. Хуунг-Мок, Л.Ф. Верещагін, Б.В. Войцехівський, Г.П. Ніконов, Р.А. Тихомиров, Ю.С. Степанів, М.А. Бурнашев, В.А. Бренер, О.Ф. Саленко, І.Л. Повх, Г.О. Атанов та інші дослідники. В Україні питаннями розроблення технології гідрорізання харчових продуктів займалися Г.В. Дейниченко (водополімерними струменями), а також І.М. Заплетніков та О.В. Гордієнко (водяними та водосольовими струменями).

Широке поширення методу різання струменем води в багатьох галузях промисловості і медицині є його висока технологічність у порівнянні з традиційними методами різання. Проте в харчовій промисловості України метод гідрорізання практично не застосовується, а у розвинутих країнах світу робились лише поодинокі спроби різання струменем води шоколаду, масла, сирів. Головною причиною того, чому метод гідрорізання не знайшов широкого застосування в харчовій промисловості, є необхідність придбання дорогого обладнання високого тиску, значні енерговитрати на формування різального струменя, а також відсутність комплексних науково-теоретичних досліджень процесу гідрорізання саме харчових продуктів та, відповідно, розробок енергоефективного обладнання для його реалізації.

Досвід застосування водяних і водосольових струменів для розрізання харчових продуктів, добутий в ХДУХТ та ДонНУЕТ, виявив безліч переваг waterjet-технології: можливість різання з одночасним обвалюванням і сортуванням м'ясної сировини в режимі 3D, енергоресурсозбеження,

забезпечення вимог високого рівня з охорони праці та санітарно-гігієнічних норм і довів перспективність гідрорізання харчових продуктів.

Отже, дослідження, спрямовані на розробку науково-теоретичних основ процесу різання водополімерним струменем харчових продуктів і обладнання для його реалізації, є інноваційними, актуальними та перспективними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України: №Д-12-17-18Б (0116U008447) «Дослідження інноваційних процесів переробки сільськогосподарської сировини з розробкою прогресивного ресурсозберігаючого обладнання харчової індустрії», №Д-14-17-П (0117U004218) «Дослідження деформаційних ефектів, що виникають при течії розчинів полімерів з метою розробки рекомендацій з оптимізації технологічних процесів», а також госпдогвірної теми №22-17Д (0117U006786) «Дослідження умов доцільності різання шляхом використання гідроструминної водополімерної обробки харчових продуктів».

Концептуальна гіпотеза роботи полягає у використанні здібності розчинів полімерів змінювати свої фізико-хімічні властивості під дією розтягуючої течії для розроблення технології універсального водополімерного різання в режимі 3D за умови ефективного використання енергетичних ресурсів та обладнання для його реалізації. Вирішення поставленої проблеми полягає у встановленні закономірностей реофізичної поведінки розчинів полімерів у гідрорізальній струменеформуєчій голівці і взаємодії водополімерного струменя з харчовими продуктами, необхідних для розвитку науково-теоретичних основ процесу різання з можливістю отримання різної конфігурації поверхні розрізів харчової сировини завдяки дії водополімерного струменя як універсального способу різання. Це стає можливим за рахунок додавання малих полімерних домішок до різального гідроструменя та оптимізації конфігурації струменеформуєчої голівки різального обладнання.

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні науково-теоретичних основ процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем та в розробці обладнання для універсального водополімерного різання в режимі 3D за умов енергоресурсозбеження.

Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

– встановити закономірності протікання розчинів полімерів, найбільш ефективних у підвищенні різальної здатності водополімерного струменя, крізь сопло струменеформуєчої голівки та з'ясувати основні реофізичні аспекти, що обумовлюють структуроутворення під час протікання розчину полімеру крізь сопло гідрорізальної струменеформуєчої голівки;

– узагальнити дані, що характеризують динаміку макромолекул у вхідній ділянці сопла гідрорізальної струменеформуєчої голівки і причини прояву значних деформаційних ефектів під час протікання крізь сопло розчинів полімерів;

– отримати і узагальнити дані про вплив на особливості гідродинамічної поведінки розчинів полімерів різних за конфігурацією гідрорізальних струменеформуючих голівок та встановити закономірності впливу структуроутворення на ефективність різання харчових продуктів водополімерним струменем;

– отримати розрахункову залежність для визначення оптимальної відстані від зрізу сопла до поверхні харчового продукту, при якому спостерігається максимальна глибина різання водополімерним струменем, а також функціональну залежність раціональної швидкості переміщення водополімерного струменя від його динамічних параметрів, діаметра сопла, міцності харчового продукту, концентрації і молекулярної маси полімеру;

– вивчити структурні особливості водополімерного струменя з метою встановлення раціональних параметрів струменеформуючої голівки і розрахункової залежності діаметра струменя по його довжині від концентрації, молекулярної маси поліетеленоксида (ПЕО), параметрів сопла та підвідного каналу;

– встановити механізм різання харчових продуктів водополімерним струменем і роль ефекту Томса в прояві аномально високої різальної здатності струменя розчину полімеру в порівнянні зі струменем води;

– розробити математичну модель процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем, яка б описувала вплив міцності харчового продукту та технологічної відстані до його поверхні від зрізу сопла, гідравлічних і динамічних параметрів водополімерного струменя, швидкості переміщення струменя, концентрації і молекулярної маси полімеру на глибину різання харчового продукту;

– теоретично обґрунтувати та експериментально довести можливість реалізації значного підвищення різальної здатності водополімерного струменя у випадку його формування в режимі осцилювання;

– розробити науково обґрунтовані принципи проектно-розрахункових опрацювань обладнання для різання харчових продуктів водополімерним струменем;

– розробити на підставі отриманих результатів концептуальне рішення конструкції машини для універсального різання харчових продуктів водополімерним струменем в режимі 3D за умов енергоресурсозбеження і провести дослідницько-промислово апробацію дослідного зразка;

– провести оцінювання економічної ефективності різання харчових продуктів водополімерним струменем.

Об'єкт дослідження – процес різання харчових продуктів водополімерним струменем в режимі 3D та механізм аномально високої різальної здатності водополімерного струменя.

Предмет дослідження – обладнання для різання харчових продуктів водополімерним струменем, розчини полімерів, а також фізико-механічні властивості (твердість, граничне напруження зрізу і межа міцності при одновісному стисканні) заморожених харчових продуктів.

Методи дослідження. Експериментальні методи дослідження з використанням: створеного гідростенду на основі установки УРГ-3020 з робочим тиском до 500 МПа і можливістю змінювати та контролювати як інтегральні, так і диференціальні параметри процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем; розроблених спеціальних стендів з термостатуванням і стабілізацією температури у широкому діапазоні (до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) для виміру твердості, граничного напруження зрізу і межі міцності при одночасному стисканні харчових продуктів; оптико-механічного комплексу для вивчення особливостей течії розчинів полімеру в умовах гідрорізальних струменеформуючих голівок різних конфігурацій; поляризаційно-оптичної установки для вивчення динаміки макромолекул полімеру у вхідній ділянці різних за конфігурацією сопел гідрорізальних голівок; капілярних та ротаційних віскозиметрів для реологічних вимірів; спеціального гідродинамічного комплексу для дослідження структури течій розчинів полімерів в умовах струменеформуючої голівки.

Теоретичні методи дослідження – методи системного аналізу, планування експерименту і математичної обробки експериментальних даних із використанням прикладних комп'ютерних програм, а також чисельне моделювання витікання в'язкопружної рідини (розчину полімеру) крізь сопло струменеформуючої голівки для розрахунку полів швидкості і їх градієнтів, а також розподілу різниці нормальних напружень, що характеризують деформаційно-напружений стан елементів рідини (клубків макромолекул) у вхідній ділянці сопла гідрорізальної голівки.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше:

– встановлено, щоб досягти однакової глибини різання заморожених харчових продуктів (в діапазоні від $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$), достатньо тиску водополімерного струменя лише 45–65% від тиску водяного струменя, і навпаки, за однакового початкового тиску спостерігається збільшення глибини і швидкості різання водополімерним струменем в 1,5–2,5 рази, що свідчить про особливий механізм його взаємодії з харчовим продуктом;

– доведено, що механізм гідроструминного водополімерного різання харчових продуктів не обумовлений ефектом Томса, а полягає в руйнівній дії водополімерного струменя, «армованого» сильно розгорнутими макромолекулярними ланцюгами та динамічними надмолекулярними структурами, що утворюються під дією розтягуючої течії у вхідній ділянці сопла струменеформуючої голівки;

– теоретично обґрунтована і експериментально доведена можливість прояву підвищення різальної здатності водополімерного струменя в осцилюючому режимі його формування, що впливає з теорії ефектів пружних деформацій;

– розроблено науково обґрунтовані принципи проектно-розрахункових опрацювань обладнання для різання харчових продуктів водополімерним струменем в режимі 3D за умов енергоресурсозбереження та забезпечення вимог

щодо екологічності виробництва; розрахунок режимів протікання водополімерного розчину крізь гідрорізальну струменеформуєчу голівку ґрунтується на використанні встановленого критерію, що характеризує початок виникнення динамічного структуроутворення у водополімерних розчинах при їх протіканні крізь сопло гідрорізальної струменеформуєчої голівки, а також рекомендацій з оптимізації процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем;

– отримано дані стосовно динаміки лінійних макромолекул у вхідній ділянці сопла гідрорізальної струменеформуєчої голівки, що дало змогу довести наявність суттєвої (60–70%) деформаційної дії гідродинамічного поля на макромолекулярні клубки ПЕО і, як наслідок, прояв значних деформаційних ефектів при протіканні водних розчинів ПЕО крізь струменеформуєчу голівку.

Удосконалено:

– уявлення про реофізичну поведінку розчинів ПЕО при витіканні з сопла гідрорізальної струменеформуєчої голівки, що полягають у спостережуваному динамічному структуроутворенні, обумовленому виникненням високого ступеня молекулярної організації за наявності негативних зворотних зв'язків; це дозволило експериментально довести наявність впливу виявлених ефектів пружних деформацій, що проявляються у вхідній ділянці сопла гідрорізальної струменеформуєчої голівки, на аномально високу різальну здатність водополімерного струменя;

– математичну модель процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем, яка описує вплив міцності продукту та відстані до його поверхні від зрізу сопла, гідравлічних і динамічних параметрів водополімерного струменя, швидкості переміщення струменя, а також концентрації і молекулярної маси полімеру на глибину різання харчового продукту.

Набули подальшого розвитку:

– уявлення стосовно раціональних параметрів струменеформуєчої голівки, що визначаються довжиною початкової ділянки водополімерного струменя, яка є функцією від концентрації і молекулярної маси полімеру і характеризує якість формування струменя розчину полімеру;

– уявлення, що для суттєвого підвищення ефективності процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем найдоцільніше використовувати незначні домішки ПЕО при формуванні гідроструменя, а раціональні параметри соплової голівки і підвідного каналу визначати, використовуючи структурні та динамічні характеристики водополімерного струменя, що дає змогу отримувати водополімерний струмінь з поліпшеними динамічними параметрами.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено концептуальні рішення конструкції машини для універсального різання харчових продуктів водополімерним струменем в режимі 3D з можливістю отримання різної конфігурації поверхні розрізів харчової сировини за умов енергоресурсозбеження та забезпечення вимог щодо екологічності

виробництва. Отримано рекомендації стосовно оптимізації процесу гідроструминного водополімерного різання заморожених харчових продуктів, реалізація яких знижує раціональний робочий тиск у 4–5 разів в порівнянні з тиском при різанні водяним струменем. Це дало змогу запропонувати універсальну гідрорізальну в режимі 3D машину МОВПС-100 з вартістю в 10 разів меншою за вартість існуючого гідрорізального обладнання.

Результати дослідницько-промислової апробації машини МОВПС-100 свідчать, що процес різання харчових продуктів водополімерним струменем є екологічно безпечним, на 60% менш енергоємним та на 25% більш ресурсозберігаючим порівняно з різанням струменем води. На технічні рішення, запропоновані в дисертаційній роботі, отримано 4 патенти України на корисну модель. Розроблено технічну документацію на машину МОВПС-100 відповідно до сформульованих науково обґрунтованих принципів проектно-розрахункових опрацювань гідроструминного водополімерного обладнання для різання харчових продуктів.

Результати роботи впроваджено (продано ліцензію на використання Know-How та технічну документацію для виробництва машини МОВПС-100) на ТОВ «Черкесск» (акт впровадження від 01.03.2017 р.), а також у навчальний процес Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (акт впровадження від 04.12.2017 р.).

Особистий внесок здобувача. Авторіві належить обґрунтування наукового напрямку, концептуальна гіпотеза роботи, ним же сформульовано мету і завдання роботи. Розроблено і виготовлено оригінальне експериментальне устаткування, обґрунтовано використання нестандартних методик проведення експериментів та обробки результатів. Розроблено технічну документацію, відповідно до якої ТОВ «Черкесск» виготовлено і проведено при авторському нагляді дослідницько-промислово апробацію машини МОВПС-100. Автор особисто провів усі експерименти, проаналізував отримані експериментальні результати і на основі цього сформулював новизну, практичну значущість, висновки, а основні науково-теоретичні положення роботи обґрунтував як новий напрям досліджень гідромеханіки різання харчових продуктів водополімерним струменем в режимі 3 D.

Обговорення, аналіз і узагальнення результатів досліджень проведено з науковим консультантом, доктором технічних наук, професором Г.В. Дейниченком.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та були схвалені на: Міжнародній науково-практичній конференції «Науково-технічна творчість молодих вчених з процесів і обладнання харчових виробництв» (м. Донецьк, 2012 р.); 26 Симпозіумі з реології (м. Москва, 2012 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка» (м. Донецьк, 2013 р.); Міжнародній інноваційній науково-практичній конференції «Сучасна торгівля: теорія, практика, перспективи розвитку» (м. Москва, 2013 р.); Міжнародній науково-технічній

конференції «Низькотемпературні і харчові технології в ХХІ столітті» (м. С.-Петербург, 2013 р.); ІХ Міжнародній науковій конференції «Техніка та технологія харчових виробництв» (м. Могилів, 2014 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності», (мм. Харків-Мелітополь-Кирилівка, 2015 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного обладнання», присвячена 50-річчю ІФНТУНГ (м. Івано-Франківськ, 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Екогеофорум-2017. Актуальні проблеми та інновації», присвячена 50-річчю ІФНТУНГ (м. Івано-Франківськ, 2017 р.); 2 Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності» (мм. Харків-Мелітополь-Кирилівка, 2017 р.).

Публікації. Матеріали дисертації опубліковано у 36 наукових працях, у тому числі: 3 монографії; 24 статті, серед яких 20 – у наукових фахових виданнях України (з них 7 – у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз), 4 – у наукових періодичних виданнях інших держав з напрямку, із якого підготовлено дисертацію (з них 1 – у виданні, що включено до міжнародних наукометричних баз); 4 патенти України на корисну модель; 5 тез доповідей та матеріалів конференцій.

Структура і об'єм роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, шести розділів, загальних висновків, списку літературних джерел у 336 найменувань (у тому числі 116 іноземних) та додатків. Основний зміст дисертації викладено на 272 сторінці, містить 27 таблиць і 69 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, розкрито її зв'язок з науковими планами і темами ХДУХТ та ІФНТУНГ, сформульовано концептуальну гіпотезу, мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено відомості про їх практичне впровадження, публікації і особистий внесок здобувача, а також заходи щодо апробації матеріалів дисертації.

Перший розділ «Різання харчових продуктів: науково-теоретичні аспекти» містить критичний огляд науково-технічної і патентної літератури за наявними механічними засобами і обладнанням для різання харчових продуктів. У цьому розділі розглядаються процес гідрорізання і галузі промисловості, де цей процес застосовується.

При гідрорізанні харчових продуктів як різальний орган використовується тонкий струмінь рідини. Від властивостей робочої рідини залежить можливість отримання необхідних гідродинамічних характеристик гідроструменя, що забезпечують максимальну продуктивність і найкращу якість поверхні розрізу з найменшими енерговитратами на формування струменя. Тому вибір типу і складу робочої рідини є одним з найбільш

важливих завдань, які необхідно вирішувати під час розроблення технологічного процесу різання харчових продуктів гідроструменем.

Проведений аналіз результатів досліджень різання харчових продуктів водяним, водосольовим, водольодяним струменями доводить перспективність технології гідрорізання. Але сьогодні для впровадження waterjet-технології у харчову промисловість потрібне придбання дорогого обладнання високого тиску. Експерименти, проведені нами раніше, із застосуванням водополімерних струменів для розрізання харчових продуктів, вказують на цілу низку переваг, властивих цьому процесу гідрорізання. Це можливість різання з одночасним обвалюванням і сортуванням м'ясної сировини в режимі 3D, енергоресурсозбеження, забезпечення вимог високого рівня з охорони праці та санітарно-гігієнічних норм.

За результатами огляду збіжної і турбулентної течій розчинів полімерів та використання полімерних домішок для різання харчових продуктів і матеріалів встановлено, що сучасні уявлення про процес гідрорізання харчових продуктів, особливо водополімерним струменем, далекі від досконалості. Це є причиною нерозуміння спостережуваних явищ як при витіканні робочої рідини зі струмененоформуючої голівки, так і при взаємодії гідроструменя з харчовим продуктом. Обґрунтовано, що до розробки науково-теоретичних основ процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем і обладнання для його реалізації можна підійти, використовуючи для цього спостережувані особливості в гідродинамічній поведінці розчинів полімерів при повздовжній течії, яка реалізується у вхідній ділянці сопла. При цьому полімер має бути безпечною речовиною та дозволеним для використання в харчовій промисловості. Таким полімером може бути поліетиленоксид різних молекулярних мас, який є безпечною речовиною та використовується в харчовій промисловості як згущувач, флокулянт та ін.

Аналітичне дослідження наявних способів і обладнання для різання харчових продуктів, а також наявних результатів вивчення ламінарних та турбулентних течій розчинів полімерів дало змогу обґрунтувати концептуальну гіпотезу, наукову проблему та завдання дослідження.

У другому розділі «Загальна методика дослідження, експериментальна техніка та матеріали» наведено організаційні, методологічні, теоретичні та технічні аспекти дослідження. Розроблено структурно-логічну схему проведення комплексного дослідження за темою дисертації (рис. 1), що дало можливість обґрунтувати загальну методику дослідження і покласти в його основу головний принцип – від фундаментальних досліджень до конкретного технологічного процесу. Проведено опис оригінальної експериментальної техніки, використаної під час проведення досліджень, а також опис нестандартних методів проведення експериментів, планування експерименту і математичної обробки експериментальних даних із використанням прикладних комп'ютерних програм.

Для обґрунтування і вибору критерію опірності замороженого харчового продукту різанню водополімерним струменем вивчено вплив твердості НВ,

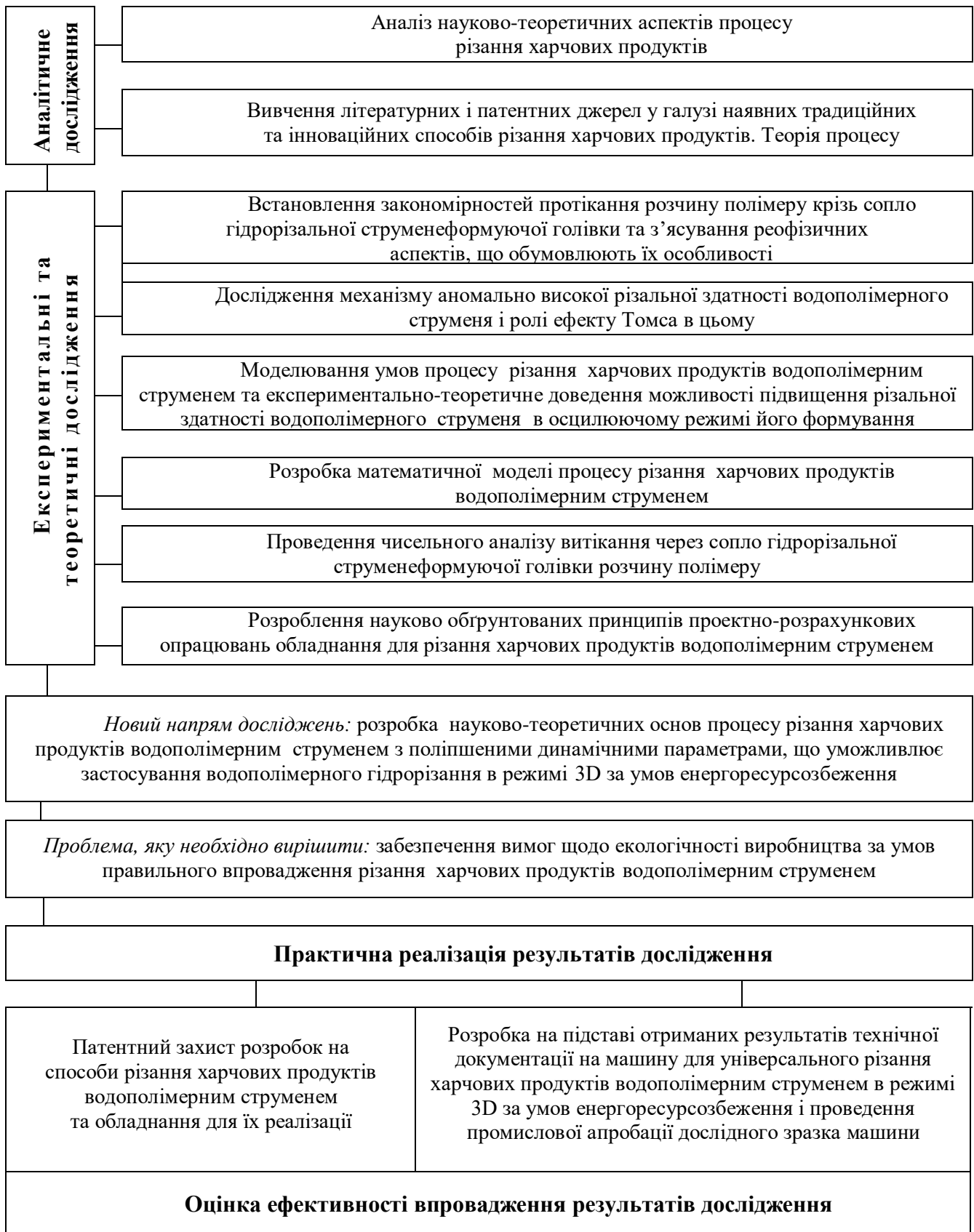


Рис. 1. Загальна схема проведення комплексного дослідження за темою дисертації

граничного напруження зрізу $\tau_{зр}$ і межі міцності за одновісного стискання $\sigma_{ст}$ філе курки бройлера, риби хека, яловичини і свинини на процес різання, а саме на глибину розрізу.

Опрацювавши експериментальні результати з використанням методу парного кореляційного аналізу, зробили висновок (за $R^2=0,994$ і $K_{вар}=4,5\%$), що критерієм опірності заморожених харчових продуктів різанню водополімерним струменем є межа міцності при одновісному стисканні $\sigma_{ст}^{max}$. Наведено характеристики розчинів ПЕО різних молекулярних мас, методичні прийоми їх приготування і способи стабілізації.

Третій розділ «Течія розчинів полімерів у гідрорізальній струменеформуючій голівці» присвячено встановленню закономірностей реофізичної поведінки розчинів полімерів в умовах сопла гідрорізальної струменеформуючої голівки.

Енергія, що розсіюється за одиницю часу при течії рідини через сопло гідрорізальної струменеформуючої голівки, дорівнює $W = \Delta P \cdot q$, де ΔP – перепад тиску в системі або на її окремих ділянках за заданої витрати q . Це робота, яку необхідно витратити в одиницю часу для продавлювання рідини крізь сопло. Наведена формула справедлива для будь-якого виду течії (зсувної, повздовжньої, а також при суперпозиції однієї та іншої) і будь-якої форми сопла струменеформуючої голівки. Дисипація енергії може бути представлена

як $W = \frac{\eta_{эф} \cdot q^2}{k_{пс}}$, де $k_{пс}$ – постійна протічної системи, $\eta_{эф}$ – ефективна в'язкість, яка

характеризує опір суцільного середовища незворотній зміні форми на різних ділянках течії і розраховується за виразом $\eta_{эф} = k_{пс} \frac{\Delta P}{q}$. Постійну $k_{пс}$ визначали

експериментально, використовуючи для цього ньютонівську рідину відомої в'язкості. Із цієї формули випливає, що дисипацію під час течії рідини можна охарактеризувати за допомогою ефективної в'язкості. Для води завжди $\eta_{эф}$ збігається з в'язкістю при зсуві, тоді як ефективна в'язкість розчинів полімеру залежить від режимів течії і є усередненою характеристикою.

Дані, що характеризують вплив швидкості витікання крізь сопло на ефективну в'язкість розчинів ПЕО різних концентрацій для молекулярних мас $4 \cdot 10^6$ та $6 \cdot 10^6$, наведені на рис. 2. Похибка вимірювання в'язкості не перевищувала 2%. Видно, що за малих швидкостей в'язкість розчинів близька до в'язкості води. За деяких критичних значень $\bar{u} = u_{кр}$ в'язкість розчинів починає зростати, причому тим різкіше, чим вища концентрація і молекулярна маса ПЕО. Відсутність зростання ефективної в'язкості води зі зростанням \bar{u} свідчить про те, що вказаний ефект не пов'язаний з інерційною турбулентністю.

На рис. 3 зображено криві, що відображають вплив кута входу в сопло на характер протікання розчину ПЕО крізь сопло гідрорізальної струменеформуючої голівки, яке має різну форму вхідної ділянки: кут входу 180° (крива 1) і 45° – стандартне сопло (крива 2), на $\eta_{эф}$.

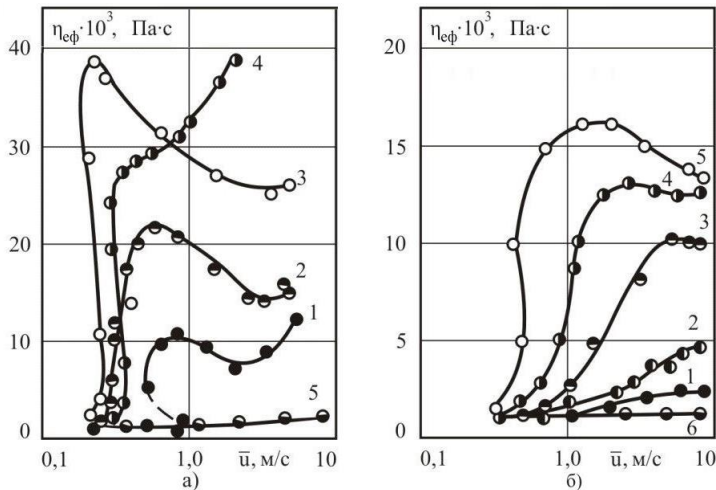


Рис. 2. Залежність ефективної в'язкості водних розчинів ПЕО від середньої швидкості витікання крізь сопло з прямокутним входом: а) $l_{\text{соп}} = 10^{-3}$ м, $d_{\text{соп}} = 0,34 \cdot 10^{-3}$ м, $M_{\text{ПЕО}} = 4 \cdot 10^6$, $C_{\text{ПЕО}}$: 1 – 0,01%, 2 – 0,02%, 3 – 0,05%, 4 – 0,1%, 5 – вода; б) $l_{\text{соп}} = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м, $d_{\text{соп}} = 0,12 \cdot 10^{-3}$ м, $M_{\text{ПЕО}} = 6 \cdot 10^6$, $C_{\text{ПЕО}}$: 1 – 0,0005%, 2 – 0,001%, 3 – 0,002%, 4 – 0,003%, 5 – 0,004%, 6 – вода

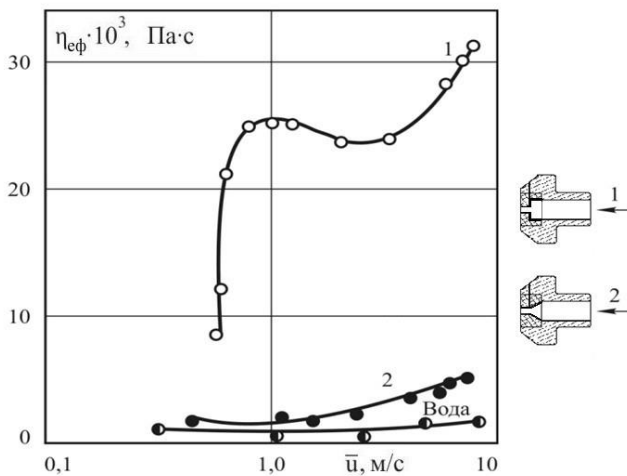


Рис. 3. Вплив кута входу в сопло на ефективну в'язкість розчину ПЕО: $M_{\text{ПЕО}} = 6 \cdot 10^6$, $C_{\text{ПЕО}} = 0,1\%$, $d_{\text{min}} = 0,53 \cdot 10^{-3}$ м; 1 – прямокутний вхід у сопло; 2 – стандартний (плавний) вхід у сопло

гідрорізальної струменеформуючої голівки у безрозмірних координатах. Експеримент проведено з використанням лазер-доплерівського анемометра з похибкою не більше 4%.

Для розчину ПЕО на докритичних режимах течії розподіл осьової швидкості майже такий, як і у води (крива 3 і точки 4 на ній). У закритичних

Видно, що течія розчину ПЕО в першому випадку має високодисипативний характер, а у другому – малодисипативний. Водночас для води кут входу в сопло помітної ролі не відіграє. Подібний висновок впливає і з аналізу даних рис. 4. Із дослідів з метою виявлення впливу кута входу в сопло на $\eta_{\text{еф}}$ розчинів ПЕО видно, що для деяких критичних значень $U_{\text{кр}}$ дисипація енергії під час протіканні водних розчинів ПЕО крізь сопло починає різко зростати, причому тим різкіше, чим вище концентрація ПЕО і кут входу.

З використанням методів візуалізації отримано дані про структуру гідродинамічного поля у вхідній ділянці сопла гідрорізальної струменеформуючої голівки під час течії водних розчинів ПЕО. Перехід до режиму течії водних розчинів ПЕО з підвищеною дисипацією енергії супроводжується утворенням вхідного затопленого струменя у вигляді «шнура», оточеного вторинною течією – тороподібним вихором.

На рис. 5 наведено результати, що відображають наростання швидкості уздовж осі потоку водного розчину ПЕО у вхідній ділянці сопла

режимах витікання спостерігається істотна деформація кривих (криві 1 і 2). Ділянка з різким падінням швидкості відноситься до вхідної зони «шнура». Із застосуванням методу графічного диференціювання кривих розподілу

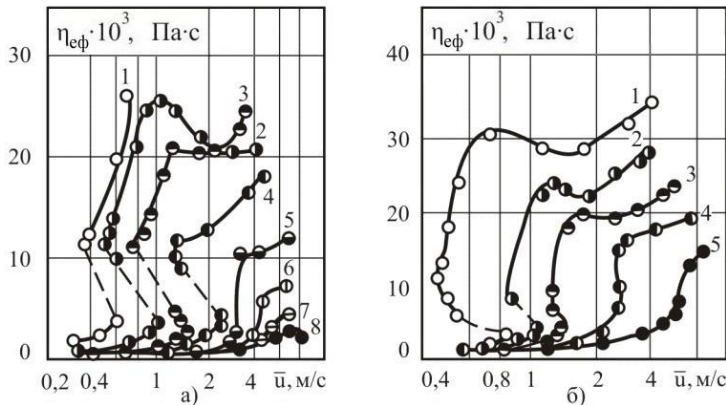


Рис. 4. Вплив концентрації ПЕО і кута входу на ефективну в'язкість під час протікання водних розчинів крізь сопло: а) сопло 1, $\beta^\circ = 180^\circ$; $M_{\text{ПЕО}} = 4 \cdot 10^6$, $C_{\text{ПЕО}}$: 1 – 0,2%, 2 – 0,1%, 3 – 0,08%, 4 – 0,06%, 5 – 0,04%, 6 – 0,03%, 7 – 0,02%, 8 – 0,01%; б) сопло 2; $M_{\text{ПЕО}} = 6 \cdot 10^6$, $C_{\text{ПЕО}} = 0,1\%$, β° : 1 – 180° , 2 – 150° , 3 – 98° , 4 – 65° , 5 – 35°

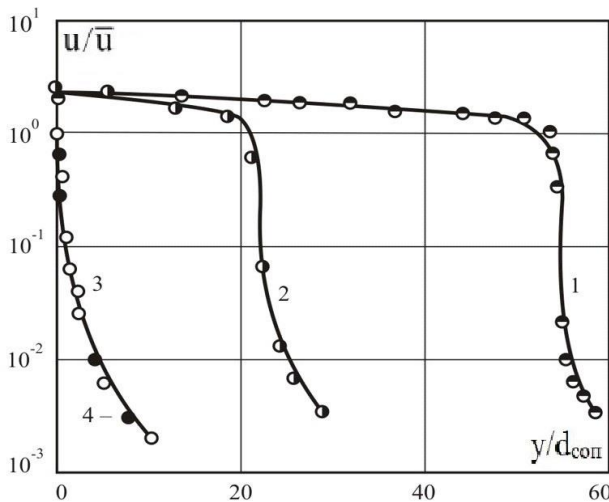


Рис. 5. Розподіл швидкості на осі потоку розчину ПЕО у вхідній ділянці сопла гідрорізальної струменеформуючої голівки: $M_{\text{ПЕО}} = 4 \cdot 10^6$; сопло 1: $d_{\text{соп}} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, $l_{\text{соп}} = 0,21 \cdot 10^{-3}$ м; сопло 2: $d_{\text{соп}} = 0,37 \cdot 10^{-3}$ м, $l_{\text{соп}} = 1,1 \cdot 10^{-3}$ м; 1) $C_{\text{ПЕО}} = 0,05\%$, сопло 1, $\bar{u} = 2,5$ м/с; 2) $C_{\text{ПЕО}} = 0,05\%$, сопло 2, $\bar{u} = 0,8$ м/с; 3) вода, сопло 2, $\bar{u} = 0,8$ м/с; 4) $C_{\text{ПЕО}} = 0,05\%$, сопло 2, $\bar{u} = 0,5$ м/с

швидкості отримано розподіл їх градієнтів на осі потоку розчину ПЕО (рис. 6).

Величина $\dot{\epsilon}_{\text{max}}$ у вхідній ділянці сопла під час течії водного розчину ПЕО суттєво нижча, ніж у потоці води без додавання ПЕО, тобто дія гідродинамічного поля призводить за принципом Ле Шательє-Брауна до змін у водополімерній системі, які спричиняють перебудову поля швидкостей так, щоб зменшити повздовжні градієнти швидкості.

Однією з найбільш важливих властивостей макромолекул ПЕО є їх власна анізотропія і анізотропія їх форми. Тому, використовуючи поляризаційно-оптичну візуалізацію течії, а також вимірюючи подвійне променезаломлення водних розчинів ПЕО, можна отримати інформацію про ступінь деформації молекулярних клубків ПЕО (розгорнутості) у вхідній ділянці сопла гідрорізальної струменеформуючої голівки. Зіставленням отриманих полів швидкості і їх градієнтів, картин течії і результатів вимірювань ступеня розгорнутості макромолекул ПЕО, а також часів релаксації водних

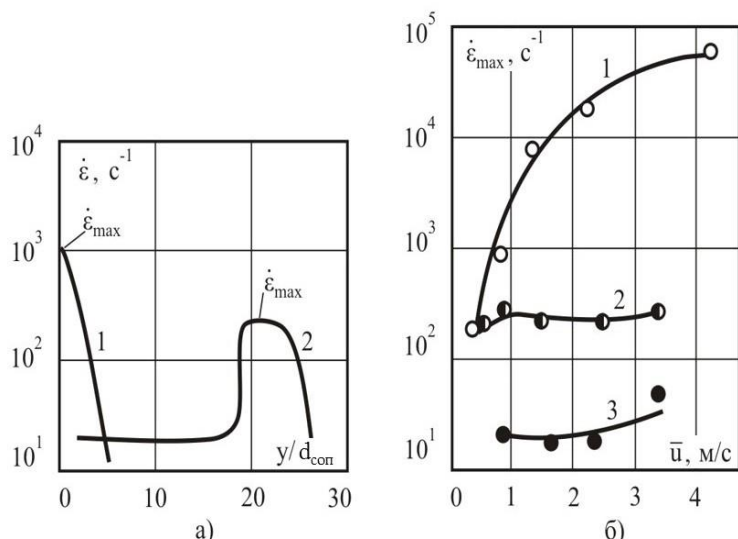


Рис. 6. Розподіл градієнта швидкості на осі потоку у вхідній ділянці сопла гідрорізальної струменеформуючої голівки: $d_{\text{соп}} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, $l_{\text{соп}} = 0,21 \cdot 10^{-3}$ м, $M_{\text{ПЕО}} = 4 \cdot 10^6$; а) $\bar{u} = 0,8$ м/с; 1 – вода; 2 – $C_{\text{ПЕО}} = 0,05\%$; б) 1 – вода; 2 – $C_{\text{ПЕО}} = 0,05\%$; 3 – $\dot{\epsilon}$ в «шнурі», $C_{\text{ПЕО}} = 0,05\%$

характеризують особливості реофізичної поведінки розчинів ПЕО під час їх протікання крізь сопло, повинні відігравати важливу роль в обґрунтуванні науково-теоретичних основ процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем, а також при розробці обладнання для його реалізації.

Четвертий розділ «Процес різання харчових продуктів водополімерним струменем» займає важливе місце в системі викладання основних положень роботи. В ньому описано результати досліджень впливу концентрації ПЕО різних молекулярних мас, а також геометричних і динамічних параметрів гідроструменя на показники процесу різання водополімерним струменем харчових продуктів, що мають різну мінусову температуру. За основні критерії оцінки ефективності процесу гідрорізання харчових продуктів були прийняті глибина розрізу h і швидкість приросту бічної поверхні розрізу S_0 .

Експериментальні дослідження впливу відстані l_0 від зрізу сопла до поверхні замороженого харчового продукту, що розрізається, на глибину розрізу h проводилися на зразках яловичини і свинини, а також філе риби хека і курки бройлера за температур t від кімнатної до -25 °С і зміни тиску ΔP_0 від 50 МПа до 150 МПа, діаметра сопла ($d_{\text{соп}}$) $0,35 \cdot 10^{-3}$, $0,6 \cdot 10^{-3}$ м і швидкості переміщення $V_{\text{п,с}}$ водополімерного струменя відносно зразка харчового продукту 0,015, 0,025, 0,050 і 0,100 м/с. Концентрація ПЕО з молекулярними масами ($M_{\text{ПЕО}}$) $3 \cdot 10^6$, $4 \cdot 10^6$ і $6 \cdot 10^6$ варіювалася від 0 до 0,05%. Відстань від сопла

розчинів ПЕО з'ясована динаміка макромолекул ПЕО у вхідній ділянці сопла струменеформуючої голівки. Встановлено, що при протіканні водного розчину ПЕО крізь сопло у закритичних режимах для області концентрацій ПЕО, що лежать між дуже розбавленими і помірно концентрованими водними розчинами, у вхідній ділянці сопла відбувається дуже суттєва деформаційна дія гідродинамічного поля на макромолекулярні клубки ПЕО (зі ступенем їх розгорнутості 60–70%).

Очевидно, що отримані дані, які

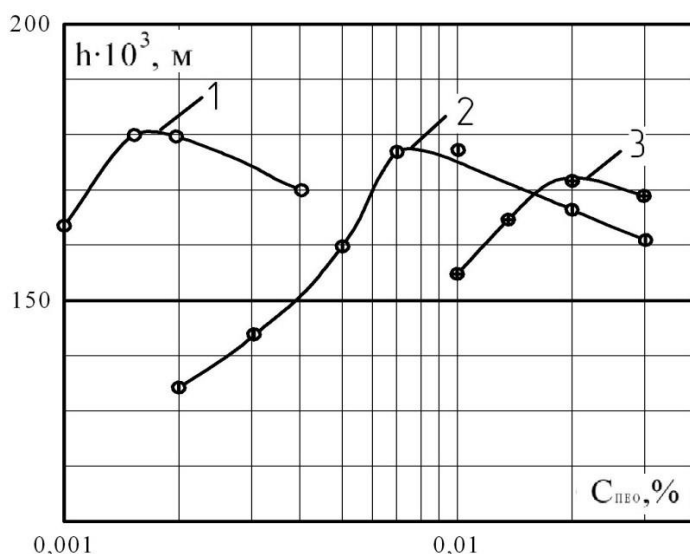


Рис. 7. Залежність глибини розрізу в філе риби хека за $t = -25 \text{ }^\circ\text{C}$ від концентрації ПЕО в водополімерному струмені: $l_o = l_{\text{опт}}$, $\Delta P_o = 100 \text{ МПа}$, $d_{\text{соп}} = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $V_{\text{п.с}} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$; $M_{\text{ПЕО}}$: 1 – $6 \cdot 10^6$, 2 – $4 \cdot 10^6$, 3 – $3 \cdot 10^6$

до поверхні харчового продукту, що розрізається, l_o змінювалася від $2 \cdot 10^{-3}$ до $100 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Похибка вимірів глибини розрізу $\sim 3\%$.

На рис. 7 наведено залежність глибини розрізу у філе риби хека від концентрації ПЕО 3-х молекулярних мас у водополімерному струмені. Водополімерний струмінь мав концентрацію ПЕО, що відповідає оптимальній. Видно, що глибина розрізу у харчовому продукті досить різко зростає зі збільшенням концентрації та молекулярної маси ПЕО і досягає максимуму за деяких оптимальних концентрацій. Для ПЕО з молекулярною масою $3 \cdot 10^6$ оптимальна концентрація дорівнює $0,015\text{--}0,020\%$, а для

молекулярних мас $4 \cdot 10^6$ і $6 \cdot 10^6$ – $0,007\text{--}0,010\%$ і $0,0015\text{--}0,0020\%$ відповідно.

Таблиця 1

Вплив відстані від зрізу сопла до поверхні яловичини, що розрізається водополімерним струменем, швидкості переміщення струменя і діаметра сопла на глибину розрізу ($C_{\text{ПЕО}} = 0,007\%$, $M_{\text{ПЕО}} = 4 \cdot 10^6$, $\Delta P_o = 50 \text{ МПа}$)

Температура м'яса $t, \text{ }^\circ\text{C}$	$d_{\text{соп}} \cdot 10^3, \text{ м}$	$V_{\text{п.с}} \cdot 10^3, \text{ м/с}$	Глибина розрізу $h \cdot 10^3, \text{ м}$								
			$l_o \cdot 10^3, \text{ м}$								
			2	2,5	3,5	4	6	10	20	60	90
-7 $^\circ\text{C}$	0,35	15	76	85	96	98	103	103	98	90	86
		25	51	58	65	67	70	71	68	61	59
		50	32	34	39	39	41	41	40	37	36
		100	19	20	23	23	24	24	23	22	21
	0,6	50	54	58	65	66	70	71	67	62	60
		100	32	35	39	40	40	41	40	37	36
-25 $^\circ\text{C}$	0,35	15	50	58	66	68	71	72	68	62	59
		25	34	40	45	46	49	49	46	42	41
		50	21	24	27	27	29	29	27	25	24
		100	12	14	16	17	18	17	14	12	12
	0,6	25	54	68	77	79	82	83	79	72	69
		50	35	41	46	47	49	50	47	42	40
100		21	24	27	28	30	30	25	20	18	

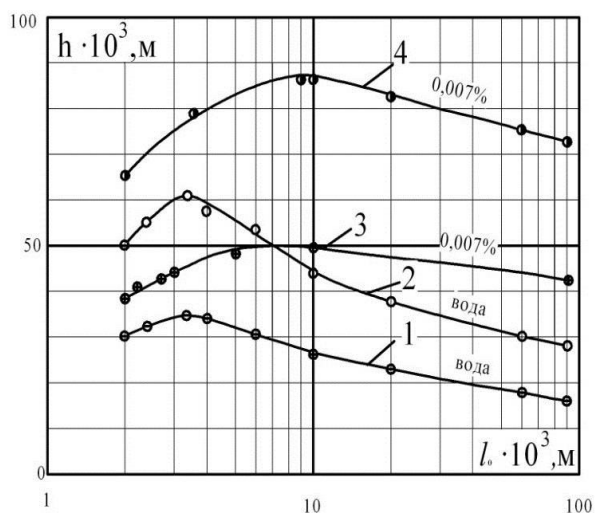


Рис. 8. Залежність глибини розрізу водополімерним струменем у м'ясі свині від відстані між його поверхнею і зрізом сопла: $M_{\text{ПЕО}} = 4 \cdot 10^6$; $t = -7 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta P_0 = 100 \text{ МПа}$; $d_{\text{соп}} = 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $V_{\text{п,с}}$: 1 і 3 – $100 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$, 2 і 4 – $50 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$

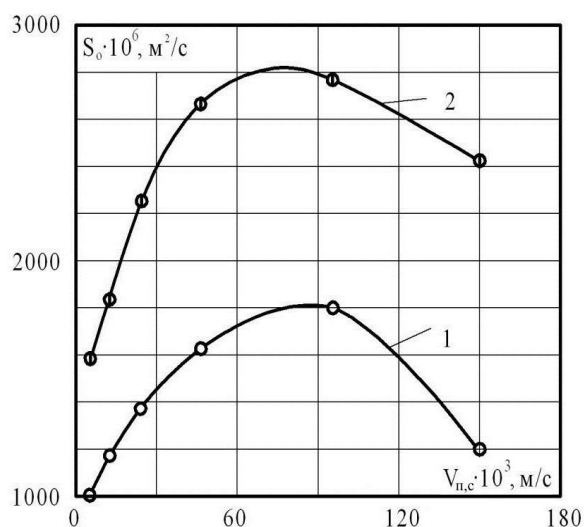


Рис. 9. Залежність швидкості приросту бічної поверхні розрізу від швидкості переміщення водополімерного струменя відносно зразка філе риби хека, що розрізається: $l_0 = l_{\text{опт}}$, $d_{\text{соп}} = 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $\Delta P_0 = 50 \text{ МПа}$, $C_{\text{ПЕО}} = 0,007\%$, $M_{\text{ПЕО}} = 4 \cdot 10^6$, t : 1 – $-25 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 – $-7 \text{ }^\circ\text{C}$

Дані, що характеризують вплив відстані від зрізу сопла до поверхні заморожених харчових продуктів, що розрізаються, на глибину розрізу при $l_0 = l_{\text{опт}}$, з похибкою вимірів $\sim 3,5\%$ наведені в табл. 1 (для яловичини) і на рис. 8 (для свинини). Видно, що залежність глибини розрізу h від відстані між зрізом сопла і поверхнею харчових продуктів l_0 проходить через максимум. Такий характер залежності h від l_0 зберігається для різних умов експерименту, тобто для усіх досліджених тисків витікання водного розчину ПЕО ΔP_0 , діаметрів сопел $d_{\text{соп}}$ і швидкостей переміщення $V_{\text{п,с}}$ водополімерного струменя відносно зразка замороженого харчового продукту. За відносно малих відстаней від 0 до $l_{\text{опт}}$ збільшення глибини розрізу зі зростанням відстані від зрізу сопла до поверхні харчового продукту відбувається внаслідок того, що процес струменеформування закінчується не безпосередньо біля зрізу сопла, а на певній відстані від нього, рівній $l_{\text{опт}}$.

Швидкість приросту бічної поверхні розрізу S_0 , яка дорівнює добутку h на $V_{\text{п,с}}$ характеризує продуктивність цього процесу. На рис. 9 представлені результати з впливу $V_{\text{п,с}}$ струменя водного розчину ПЕО відносно зразка харчового продукту, що розрізається, на швидкість приросту бічної поверхні розрізу (похибка вимірів $\sim 6,5\%$). Проаналізувавши отримані дані, можна зробити висновок, що незалежно від температури харчового продукту, тиску витікання водного розчину ПЕО і діаметра сопла, швидкість приросту поверхні розрізу зі збільшенням швидкості переміщення водополімерного струменя спочатку збільшується, досягає свого максимуму

і починає зменшуватися.

Отриманий вигляд залежності S_0 від $V_{п,с}$ обумовлений тим, що, як впливає з рис. 9 і табл. 1, більшій глибині розрізу відповідає менше значення $V_{п,с}$, і навпаки, більшій швидкості переміщення водополімерного струменя відносно харчового продукту відповідає менше значення h . Тому швидкість приросту поверхні розрізу дорівнює добутку цих величин. На межах дослідженого діапазону $V_{п,с}$ зміна S_0 буде меншою, ніж всередині.

Дослідження впливу концентрації ПЕО на продуктивність різання яловичини за температури -25°C водополімерним струменем з тиском витікання 100 МПа і діаметром сопла $0,35 \cdot 10^{-3}$ м свідчить, що раціональна швидкість різання значно зростає зі збільшенням концентрації ПЕО у водополімерному струмені і досягає максимуму за оптимальної величини $C_{ПЕО}$. Для ПЕО з молекулярною масою $4 \cdot 10^6$ отримали, що $C_{опт}$ дорівнює 0,01%, а для молекулярної маси ПЕО $6 \cdot 10^6$ – 0,002%. Додавання до водяного струменя домішок ПЕО підвищило продуктивність різання майже удвічі при $l_0 = l_{опт}$ і в 4–5 рази при $l_0 = 90 \cdot 10^{-3}$ м.

Використовуючи метод множинної регресії отримано функціональну залежність раціональної швидкості переміщення водополімерного струменя $V_{рац,п,с}$ відносно зразка харчового продукту від діаметра сопла $d_{соп}$ і межі міцності замороженого харчового продукту $\sigma_{ст}$ для $l_0 = l_{опт}$ у такому вигляді:

$$V_{рац,п,с} = \frac{\theta_0 e^k 2Q \cdot \text{tg}(\beta^\circ / 2)}{d_{соп}^3 \cdot \sigma_{ст}^{0,02}}, \quad (1)$$

де θ_0 – час релаксації при нескінченному розбавленні розчину ПЕО, с; $k = [\eta]_0 \cdot C_{ПЕО}$; $[\eta]_0$ – характеристична в'язкість, $\text{м}^3/\text{кг}$; $C_{ПЕО}$ – концентрація, $\text{кг}/\text{м}^3$; Q – швидкість витікання розчину, $\text{м}^3/\text{с}$; β° – кут входу в сопло, рад; $d_{соп}$ – діаметр отвору сопла, м; $\sigma_{ст}$ – гранична міцність при одновісному стисканні, МПа.

Вплив молекулярної маси ПЕО і його концентрації у водополімерному струмені в рівнянні (1) враховується залежністю часу релаксації $\theta_c = \theta_0 e^k$ водних розчинів ПЕО від молекулярних характеристик ПЕО. При $\dot{\epsilon} \cdot \theta_c < 1$ раціональна швидкість переміщення $V_{рац,п,с}$ водополімерного струменя дорівнює $V_{рац,п,в}$ водяного струменя. Формула (1) має такі межі застосовності: водні розчини ПЕО задовольняють критерію концентрованості Дебая – $[\eta]_0 \cdot C_{ПЕО} < 1$ і за умови, що $1 \leq \dot{\epsilon} \theta_c < 10$. Зіставивши отримані експериментальні дані з розрахованими за формулою (1) можна підсумувати, що індекс кореляції склав 0,902, а коефіцієнт варіації не перевищив $K_{вар} = 9,4\%$, що вказує на відносно високу збіжність розрахункових і експериментальних даних.

Експериментальні дані свідчать (рис. 10), що якість поверхні розрізів у замороженому харчовому продукті при його розрізанні водополімерним струменем істотно вища, ніж при розрізанні водяним струменем.

Інтерпретація отриманих експериментальних даних вимагала вирішення питання про структуру водополімерного струменя за різних концентрацій і

молекулярних мас ПЕО, а також ступеня його силової дії на перешкоду. За результатами експерименту режим роботи і параметри процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем, а також продуктивність при використанні дослідного зразка машини МОВПС-100 безпосередньо залежать від структури струменя і зміни його гідродинамічних параметрів.

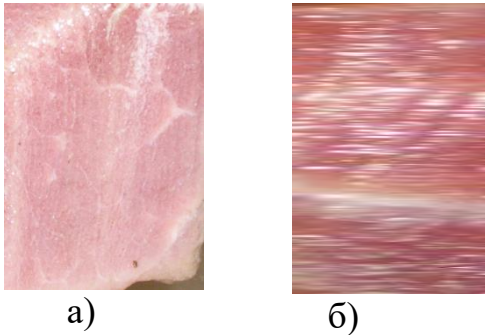


Рис. 10. Фотографії поверхонь розрізу гідроструменями в замороженій свинині: а – водополімерний струмінь; б – водяний струмінь; $C_{\text{ПЕО}} = 0,007\%$, $M_{\text{ПЕО}} = 4 \cdot 10^6$; $l_0 = l_{\text{опт}}$; $\Delta P = 100 \text{ МПа}$; $V_{\text{п,с}} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$; $t = -25^\circ\text{C}$

Відомо, що струмінь рідини на виході з сопла складається з початкової ділянки $l_{\text{п}}$, основної ділянки $l_{\text{осн}}$ і капілярного потоку. Основною структурною характеристикою струменя є довжина $l_{\text{п}}$. Довжина початкової ділянки характеризує якість формування струменя рідини. Для водополімерного струменя довжина $l_{\text{п,с}}$ залежить від молекулярної маси і концентрації ПЕО. Вивчення структури струменя водного розчину ПЕО свідчить про те, що використання домішок ПЕО призводить до суттєвого збільшення $l_{\text{п,с}}$ і компактності за рахунок зменшення діаметра водополімерного струменя відносно водяного струменя.

Зіставлення експериментальних і розрахункових значень безрозмірної величини початкових ділянок водяного і водополімерного струменів були виконані з використанням експериментально отриманого розподілу сили їх дії на металеву перешкоду, спрямовану вздовж осі потоку (рис. 11). Отримані експериментальні дані з достатньою точністю описуються таким рівнянням:

$$\frac{l_{\text{п,с}}}{d_{\text{соп}}} = \frac{l_{\text{п,в}}}{d_{\text{соп}}} \cdot \varepsilon \cdot \theta_c = 25(d_{\text{соп}} / R_{\text{аз}})^{1/6} \lg K_{\text{П}} (1 - 1,25 \exp(-0,095 \cdot l_{\text{пр}} / d_{\text{пр}})) \cdot \varepsilon \cdot \theta_c, \quad (2)$$

де $K_{\text{П}}$ – коефіцієнт підтискання потоку, дорівнює 10 при відношенні довжини до діаметру проточного каналу голівки $l_{\text{пр}}/d_{\text{пр}} > 10$; $R_{\text{аз}}$ – параметр шорсткості внутрішньої поверхні струменеформуючої голівки.

При $\varepsilon \cdot \theta_c < 1$ початкова ділянка водополімерного струменя $l_{\text{п,с}}$ дорівнює початковій ділянці водяного струменя $l_{\text{п,в}}$. Коефіцієнт варіації при використанні залежності (2) склав $K_{\text{вар}} = 11\%$.

Розміри $l_{\text{п,с}}$ мають важливе значення при розробленні процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем. Виявляється, що при різанні харчових продуктів найбільш ефективною є робоча ділянка струменя, яка дорівнює сумі початкової і основної ділянок. За межами робочої ділянки гідрострумінь втрачає стійкість і набуває звивистої форми. Ця ділянка в технології гідрорізання є практично неробочою. Експериментальне дослідження ширини розрізів харчового продукту свідчить про те, що водополімерний струмінь має значно кращі, ніж водяний струмінь,

гідродинамічні властивості (менший діаметр і, відповідно, меншу ширину розрізу), що забезпечують високу продуктивність і ресурсозбереження за високої якості бічної поверхні розрізів.

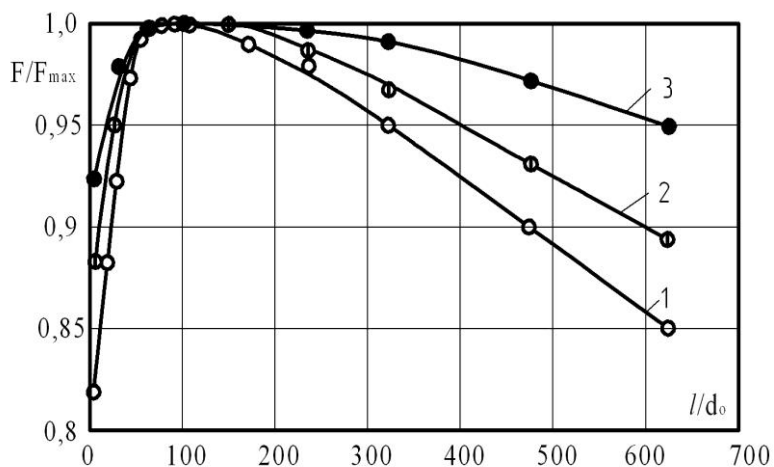


Рис. 11. Розподіл сили дії водяного струменя (1), струменя 0,003% водного розчину ПЕО (2) і 0,007% водного розчину ПЕО (3) з молекулярною масою $4 \cdot 10^6$ на перешкоду вздовж осі потоку

де сила дії струменя на перешкоду зростає і досягає (на деякій відстані від сопла) максимального значення, і наступна ділянка, протягом якої ця сила зберігається незмінною. Усунення цих протиріч потрібне для обґрунтування фізичних закономірностей механізму мікроруйнування у харчових продуктах і отримання коректного взаємозв'язку між параметрами процесу гідрорізання, без чого неможливе встановлення раціональних параметрів обладнання для різання харчових продуктів водополімерним струменем.

Енергетичні можливості водополімерного струменя оцінювалися за вимірюваною силою дії струменя на сталеву перешкоду, на якій були закріплені тензодатчики. Результати, які відображають розвиток сили дії гідроструменя з різним вмістом ПЕО на перешкоду вздовж осі потоку у безрозмірних координатах з похибкою вимірювань не більше 4%, представлені на рис. 11. Видно, що максимальне значення сили дії водополімерного струменя на плоску перешкоду залежить від концентрації ПЕО у водополімерному струмені і знаходиться в інтервалі безрозмірних відстаней від сопла $30 < l_0/d_{соп} < 300$. Порівнюючи розподіл сили дії гідроструменя на перешкоду вздовж осі потоку зі структурними особливостями, можна зробити висновок, що область $l_0/d_{соп} < 100$ відноситься до початкової ділянки струменя, а область $30 < l_0/d_{соп} < 300$ – до робочої ділянки.

Експериментальні дані з динаміки водополімерного струменя цілком пояснюють характер зміни різальної здатності струменя залежно від відстані між поверхнею харчового продукту, який розрізається, і зрізом сопла. Ураховуючи дані рис. 11, дійшли до висновку: якщо відстань від сопла до поверхні харчового продукту менша за розмір початкової ділянки

Нині повністю не з'ясований характер зміни сили дії водополімерного струменя від відстані між соплом і перешкодою. Із цього приводу навіть для водяного струменя існують суперечливі точки зору. Одні дослідники вважають, що сила дії струменя на перешкоду істотним чином зменшується зі збільшенням відстані від зрізу сопла. Інші вважають, що повна довжина водяного струменя може бути розбита на дві ділянки: початкова ділянка,

водополімерного струменя, то збільшення діаметра вихідного отвору сопла призводитиме до зменшення глибини розрізу. Якщо ж відстань від сопла до поверхні харчового продукту наближається до розміру основної ділянки водополімерного струменя або перевищує його, тоді глибина розрізу зростатиме зі збільшенням діаметра сопла за незмінного перепаду тиску.

Типові дані, що характеризують процес різання заморожених харчових продуктів водополімерним струменем, наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Вплив відстані від зрізу сопла до поверхні риби хека, що розрізається водополімерним струменем, швидкості переміщення струменя і діаметра сопла на глибину різання ($C_{\text{ПЕО}}= 0,007\%$, $M_{\text{ПЕО}}= 4 \cdot 10^6$, $\Delta P_o= 100$ МПа)

Температура риби $t, ^\circ\text{C}$	$d_{\text{соп}} \cdot 10^3, \text{ м}$	$V_{\text{п,с}} \cdot 10^3, \text{ м/с}$	Глибина розрізу $h \cdot 10^3, \text{ м}$						
			$l_o \cdot 10^3, \text{ м}$						
			2	4	6	10	20	60	90
-7 $^\circ\text{C}$	0,35	15	181	>200	>200	>200	>200	>200	>200
		25	122	159	166	168	163	146	141
		50	76	93	98	99	94	87	85
		100	45	56	57	58	56	51	50
	0,60	50	129	158	166	168	160	149	144
		100	77	95	96	99	95	87	85
-25 $^\circ\text{C}$	0,35	15	104	144	150	148	144	130	125
		25	71	97	102	103	97	89	86
		50	43	58	61	61	58	52	50
	0,60	25	115	165	174	176	165	151	146
		50	73	98	102	104	98	88	85

Комплексне вивчення особливостей процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем та аналіз отриманих експериментальних даних, що характеризують процес гідроструминного водополімерного різання філе риби хека, курки бройлера, свинини і яловичини з використанням методів теорії подібності і розмірності, а також методів математичної статистики, дало змогу розробити математичну модель процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем, яка б описувала вплив міцності $\sigma_{\text{ст}}$ харчового продукту та відстані l_o до його поверхні від зрізу сопла, гідравлічних ΔP_o і динамічних $V_{o,c}$ параметрів водополімерного струменя, швидкості переміщення $V_{\text{п,с}}$ струменя, концентрації і молекулярної маси полімеру на глибину різання h харчового продукту:

$$\frac{h}{d_{\text{соп}}} = \frac{\Delta P_o}{\sigma_{\text{ст}}} \cdot \left(\frac{l_o}{5,4 \cdot 1_{\text{п.в}} \cdot \dot{\epsilon} \cdot \theta_c} \right)^{-0,25} \cdot \left(\frac{V_{o,c}}{V_{\text{п,с}}} \right)^{0,75} \cdot 10^{-2}, \quad (3)$$

$$\text{де } \dot{\epsilon} \cdot \theta_c = \theta_0 e^k \frac{2Q \cdot \text{tg}(\beta^\circ / 2)}{d_{\text{соп}}^3}, \text{ а } k = [\eta]_0 \cdot C_{\text{ПЕО}} \leq 1.$$

Вплив молекулярної маси ПЕО і його концентрації у водополімерному струмені у рівнянні (3) враховується залежністю часу релаксації $\theta_c = \theta_0 e^k$ водних розчинів ПЕО від $M_{\text{ПЕО}}$ і $C_{\text{ПЕО}}$. За умови, що $\dot{\epsilon} \cdot \theta_c < 1$ $I_{\text{п,с}}$ дорівнює $I_{\text{п,в}}$. Особливістю рівняння (3) є те, що воно враховує якість формування струменя водного розчину ПЕО при варіації $C_{\text{ПЕО}}$ і $M_{\text{ПЕО}}$. Коефіцієнт кореляції для виразу (3) $R^2 = 0,86$, а коефіцієнт варіації дослідних даних відносно

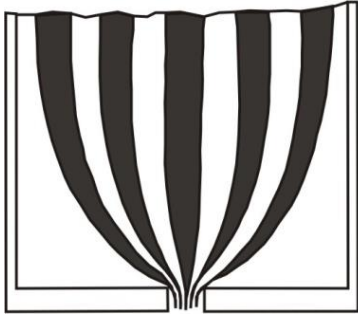


Рис. 12. Картина течії у вхідній ділянці сопла при інжекції водного розчину ПЕО у воду: $M_{\text{ПЕО}} = 6 \cdot 10^6$, $C_{\text{ПЕО}} = 0,03\%$, $\bar{u} < u_{\text{кр}}$

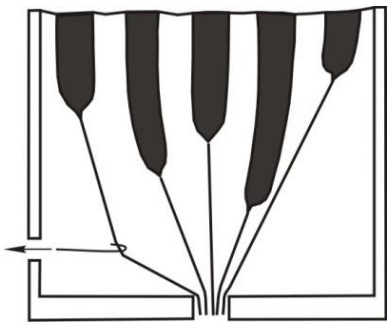


Рис. 13. Картина течії у момент дії дротяного зонду на водополімерну нитку, яку «пряде» гідродинамічне поле: $M_{\text{ПЕО}} = 6 \cdot 10^6$, $C_{\text{ПЕО}} = 0,03\%$, $\bar{u} = 2,5 \text{ м/с}$, $\bar{u} > u_{\text{кр}}$

розрахункових не більше $K_{\text{вар}} = 12,2\%$. Цим підтверджується адекватність отриманої математичної моделі експериментальним даним.

Недовіра до ідеї стосовно механізму аномально високої різальної здатності водополімерного струменя, однозначно пов'язаного з течією із розтягом, різко зменшилася після фундаментальних вимірювань коефіцієнта подвійного променезаломлення за надкритичних режимів течії, що дало змогу довести можливість фазового переходу «клубок–розгорнутий ланцюг» ПЕО при збіжній течії, яка реалізується у вхідній ділянці сопла. Однак все ще не існувало адекватного експериментального підтвердження динамічного структуроутворення, тобто поділу фаз у водних розчинах ПЕО під час протікання крізь сопло струменеформуючої голівки.

Експериментальні дослідження свідчать, що у водних розчинах ПЕО можна спостерігати структуроутворення під час течії у вхідній ділянці сопла. Для створення гідродинамічного поля з розтягом використали модель вхідної ділянки сопла – збіжний потік води до малого отвору в пластині діаметром $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, куди вводили струминки розчину ПЕО (рис. 12 і 13). За невеликих швидкостей витікання підфарбовані струминки водного розчину ПЕО візуалізують лінії течії основного потоку (рис. 12). Досягши деякої критичної витрати

води крізь отвір сопла, характер течії струминок водного розчину ПЕО різко змінюється: досить товсті струминки водного розчину ПЕО трансформуються у тонкі нитки (рис. 13).

У докритичних режимах витікання води переміщення дротяного зонду в перпендикулярній до струминок площині не змінює картини течії. Струминки водного розчину ПЕО проникні для нього. Якщо цей же експеримент повторити у закритичному режимі витікання, то можна захопити одну або декілька ниток водного розчину ПЕО і відвести їх убік, як показано на рис. 13. Це можливо лише за наявності достатньо сильної взаємодії між молекулами ПЕО, тобто за наявності надмолекулярної структури, що утворюється під дією розтягуючого гідродинамічного поля. Ці дані є принциповими стосовно вирішення питання про сутність явища, що обумовлює аномально високу різальну здатність водополімерного струменя.

Для кращого розуміння механізму аномально високої різальної здатності водополімерного струменя були проведені експерименти з використанням імпульсного водомета. Для якісної оцінки енергетичних можливостей струменя у досліджах вивчали взаємодію струменя з перешкодою (рис. 14), встановленою на фізичному маятнику. Отримані експериментальні результати свідчать, що максимальна відстань від водомета до перешкоди, коли ще спостерігається її пробій, складає: для води – 1,5 м, для 0,0008% водного розчину ПЕО – 2,5 м. Важливо також те, що домішки ПЕО знижують середню швидкість струменя на 8–10% (похибка вимірів 1%). З цього випливає, що висока різальна здатність водополімерного струменя не обумовлена ефектом Томса.

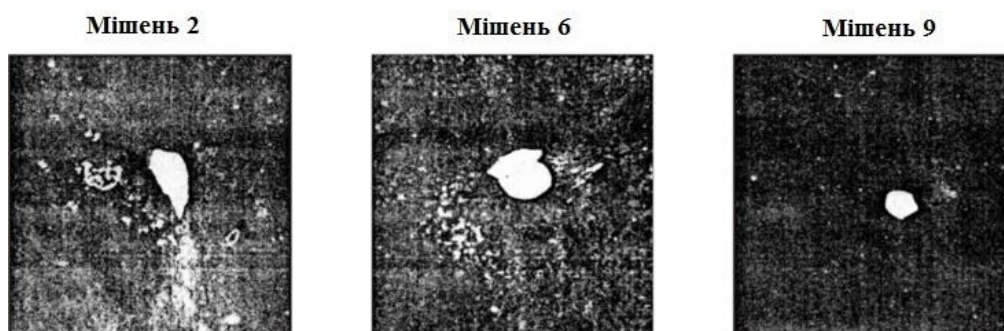


Рис. 14. Фотографії перешкод-мішеней після взаємодії зі струменями води і водного розчину ПЕО: мішені: 2 – вода; 6 – $M_{\text{ПЕО}} = 6 \cdot 10^6$, $C_{\text{ПЕО}} = 0,0004\%$; 9 – $M_{\text{ПЕО}} = 6 \cdot 10^6$, $C_{\text{ПЕО}} = 0,0008\%$

Узагальнення результатів спеціальних дослідів дало змогу з'ясувати молекулярно-надмолекулярний механізм різання харчових продуктів водополімерним струменем. Так, механізм аномально високої різальної здатності водополімерного струменя не обумовлений ефектом Томса, а полягає в руйнівній дії динамічного тиску водополімерного струменя, «армованого» сильно розгорнутими макромолекулярними ланцюгами та динамічними надмолекулярними структурами, що утворюються під дією розтягуючої течії у вхідній ділянці сопла струменеформуючої голівки.

В п'ятому розділі «Удосконалення процесу водополімерного різання харчових продуктів» розглянуті питання, що стосуються перспективи вдосконалення процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем шляхом реалізації осцилюючого режиму формування водополімерного

струменя, а також охолодженням водополімерного струменя до температури нижче 0 °С парама рідкого азоту.

При деформації полімерних систем, у нашому випадку водного розчину ПЕО, зміни величини деформації ε і напруження σ відбуваються на різних фазах. Кут δ' , що характеризує цю різницю, є складною функцією частоти дії ω' . Деформація у нашому випадку виникла під дією напруження, що змінюється згідно із законом:

$$\sigma(\tau) = \bar{\sigma} + \sigma_0 \exp(i \omega' \tau), \quad (4)$$

де $\bar{\sigma}$ – стаціонарне напруження; τ – час.

Враховуючи, що $\sigma(\tau) = \sigma_0 \cos \omega' \tau$, $\varepsilon(\tau) = \varepsilon_0 \cos(\omega' \tau - \delta')$, і виключаючи час з цих рівностей, одержимо рівняння:

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2 = \varepsilon^2 \delta' + \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right) \cos \delta'. \quad (5)$$

Вираз (5) є рівнянням еліпса, площа якого дорівнює роботі A_0 , що здійснюється за цикл гармонічних коливань і незворотно втрачається (дисипується) при деформації. Тоді функція дисипації W обчислюється як добуток A_0 на число циклів за одиницю часу:

$$W = A_0 \frac{\omega'}{2\pi} = \frac{\varepsilon_0 \sigma_0 \omega'}{2} \sin \delta'. \quad (6)$$

З (6) видно, що дисипативна функція за однакових умов деформації залежить лише від характеристик полімеру, що виражаються значенням δ' .

Змінюючи напруження за гармонічним законом, можна стежити за зміною швидкості деформації $\dot{\varepsilon}$. Остання пов'язана з деформацією таким чином:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{d\tau} = \varepsilon_0 i \omega' \exp[i(\omega' \tau - \delta')] = i \omega' \varepsilon. \quad (7)$$

Величина відношення $\frac{\sigma}{\varepsilon}$ є комплексною динамічною в'язкістю η^* . Цю величину можна подати у вигляді різниці дійсної та уявної компонент

$$\eta^* = \eta' - i\eta'', \quad (8)$$

де $\eta' = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega'}\right) \sin \delta'$, $\eta'' = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega'}\right) \cos \delta'$.

Ввівши у співвідношення (6) величину η' , яку, зазвичай називають динамічною в'язкістю, і здійснивши перетворення, отримаємо

$$W = \eta' \frac{\varepsilon_0^2 \cdot \omega'^2}{2}. \quad (9)$$

Динамічна в'язкість проявляється у системі під час деформації, а приріст ефективної в'язкості $\Delta\eta_{\text{эф}}$ в умовах накладення на основну течію дії гармонічних коливань можна пояснити привнесенням величини η' . Оскільки

під час експерименту амплітудне значення величини деформації ε_0 залишалося постійним, можна скористатися скейлінгом і переписати вираз (9) у вигляді:

$$W \approx \Delta\eta_{\text{еф}} \cdot \omega'^2. \quad (10)$$

Аналіз кривих дисипативної функції, отриманих з виразу (10) для експериментальної залежності $\Delta\eta_{\text{еф}}/\eta_{\text{еф}}$ від ω' , показує, що з підвищенням середньої швидкості витікання у водному розчині ПЕО збільшується частка макромолекул (із-за наявності молекулярно-масового розподілу), які зазнали більшого розгортання і набули наведеної жорсткості, тому дисипація пульсаційної течії зменшується. Порогові значення частоти, починаючи з якого течія стає помітно дисипативною, для менш «гнучких» і витягнутих макромолекул зростає. Зі збільшенням наведеної жорсткості макромолекул дисипативна крива набуває більш вираженого (екстремального) вигляду. Як бачимо з отриманих даних, осцилююче формування водополімерного струменя повинне забезпечувати більш високу, ніж при стаціонарному режимі, різальну його здатність.

Експериментальне вивчення впливу частоти осцилюючого режиму формування струменя водного розчину ПЕО на глибину розрізу харчового продукту проводилися з використанням гідрорізальної установки, забезпеченої електромеханічним клапаном для періодичного переривання струменя. Порівнюючи дані табл. 3, зробили висновок, що більш високою різальною здатністю володіє струмінь водного розчину ПЕО в режимі осцилюючого протікання крізь струменеформуючу голівку.

Таблиця 3

Глибина різання замороженої свинини водяним і водополімерним струменями ($M_{\text{ПЕО}} = 6 \cdot 10^6$, $C_{\text{ПЕО}} = 0,002\%$, $\Delta P_0 = 100$ МПа, $d_{\text{соп}} = 0,35 \cdot 10^{-3}$ м, $V_{\text{п.с}} = 15 \cdot 10^{-3}$ м/с, $t = -25$ °С, $l_0 = l_{\text{опт}}$)

Глибина розрізів $h \cdot 10^3$, м			
Струмінь води	Осцилюючий водяний струмінь	Струмінь водного розчину ПЕО	Осцилюючий водополімерний струмінь
104	110	157	184

Таким чином, проведені досліді підтвердили передбачене з теорії ефектів пружних деформацій в умовах течії з розтягом розчинів полімерів: різальна здатність водополімерного струменя в осцилюючому режимі його формування суттєво підвищується.

В цьому ж розділі також побудовано схему процесу деградації водних розчинів ПЕО, що дало змогу виявити фізико-хімічну поведінку макромолекул в умовах складних гідродинамічних полів і намітити шляхи підвищення ефективності використання різання харчових продуктів водополімерним струменем.

Експериментальне вивчення впливу температури водополімерного струменя на глибину розрізу проводилося на зразках яловичини за температури $t = -25^{\circ}\text{C}$, тисків води ΔP_0 40, 100 і 150 МПа, діаметра сопла $d_{\text{соп}} 0,35 \cdot 10^{-3}$ м і швидкості переміщення гідроструменя відносно зразка замороженого м'яса $V_{\text{п,с}} 15 \cdot 10^{-3}$ м/с. Аналіз отриманих експериментальних результатів свідчить, що вдосконалення процесу різання харчових продуктів з використанням водополімернольодових струменів, у яких роль абразиву відіграють частинки льоду, що утворюються у процесі охолодження струменя водного розчину ПЕО парами рідкого азоту, що подається у коліматор, дає можливість підвищити глибину розрізу на 25–35%. Однак при цьому погіршуються гідродинамічні параметри струменя і збільшується ширина розрізу.

У шостому розділ «Принципи проектно-розрахункових опрацювань обладнання для різання харчових продуктів водополімерним струменем» розроблено наукові основи для проектно-розрахункових опрацювань гідрорізального водополімерним струменем обладнання для харчових продуктів, а також для вдосконалення існуючих схем гідрорізання.

Проведене комплексне вивчення реакції водних розчинів ПЕО на гідродинамічний вплив дало змогу з'ясувати закономірності прояву деформаційних ефектів під час течії розчинів ПЕО у гідрорізальній струменеформуючій голівці. Комплексність наукового підходу стала необхідною умовою успішного вирішення поставлених завдань не лише наукових, але і технічних, полягала у тому, що процес формування надмолекулярних утворень під дією гідродинамічного поля, а отже, і властивостей водних розчинів ПЕО, розглянутий з урахуванням (і виділенням) внеску всіх стадій взаємного впливу водного розчину ПЕО і структури гідродинамічного поля. При цьому динаміка макромолекул ПЕО у вхідній ділянці сопла струменеформуючої голівки вивчалася з використанням оригінальних методичних прийомів. Це дало можливість сформулювати деяку нову структурну концепцію, «спільним знаменником» якої є прояв суттєвої деформуєчої дії гідродинамічного поля на макромолекулярні клубки ПЕО (з їх розгортанням 60–70%), що миттєво породжує прояв каучукоподібних властивостей, а утворювані асоціати незалежно від природи – свого роду гумоподібну високоеластичність. Науково обґрунтований шлях розроблення науково-теоретичних основ процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем і є шлях, пов'язаний з використанням гумоподібних властивостей водних розчинів ПЕО, які можуть проявитися за певних умов протікання крізь струменеформуючу голівку.

Розрахунок режимів протікання водного розчину ПЕО крізь гідрорізальну голівку ґрунтується на використанні встановленого критерію, що характеризує початок переходу «клубок-розгорнутий ланцюг» та виникнення динамічного структуроутворення у полімерному розчині. Отже, технологічні показники слід розраховувати, виходячи з умови виконання нерівності:

$$\dot{\varepsilon} \cdot \theta_c \geq De_{\text{кр}} \cdot \quad (11)$$

Співвідношення (11) слід трактувати як число Дебора, оскільки обернена величина повздовжнього градієнта швидкості є часовим масштабом течії. Таким чином, розрахунок зводиться до визначення часу релаксації θ_c розчину ПЕО і повздовжнього градієнта швидкості $\dot{\epsilon}$, що реалізується, при течії розчину у вхідній ділянці сопла струменеформуючої голівки.

Час релаксації можна визначити експериментально, використовуючи результати розділу 3. Час релаксації також піддається обчисленню, для чого отримано в аналітичному вигляді вираз, що пов'язує θ_c з концентрацією, температурою і молекулярними характеристиками ПЕО:

$$\theta_c = \begin{cases} \theta_0 e^k & \text{при } k < 1 \\ \theta_0 \frac{e k^{2/3}}{k^{1/3}} & \text{при } k > 1 \end{cases}, \quad (12)$$

де $k = [\eta]_0 \cdot C_{\text{ПЕО}}$.

Експериментальні точки для молекулярних мас $4 \cdot 10^6$ і $2 \cdot 10^6$ задовільно лягають на розрахункову за виразом (12) криву. Вплив температури у цьому виразі враховується температурною залежністю θ_0 і k .

Визначення *повздовжнього градієнта швидкості* можна звести до розв'язання рівняння руху ньютонівської рідини в конфузурі, яким і є вхідна ділянка сопла (рис. 15). Природним обмеженням використання співвідношення для градієнта швидкості, отриманого під час розв'язання задачі про течію ньютонівської рідини в конфузурі, для розрахунку $\dot{\epsilon}$ під час течії водного розчину ПЕО, є витратні швидкості і кути входу, з яких проявляється надкритичний режим витікання з сопла струменеформуючої голівки. Критичне число $De_{\text{кр}}$ у цьому випадку відрізнятиметься від теоретично отриманого Петерліном значення $De_{\text{кр}} = 0,5$, тому визначається експериментально. Так, за критичне (уявне) число Дебора береться число, починаючи зі значення якого у водополімерного струменя проявляється вища, ніж у водяного струменя різальна здатність.

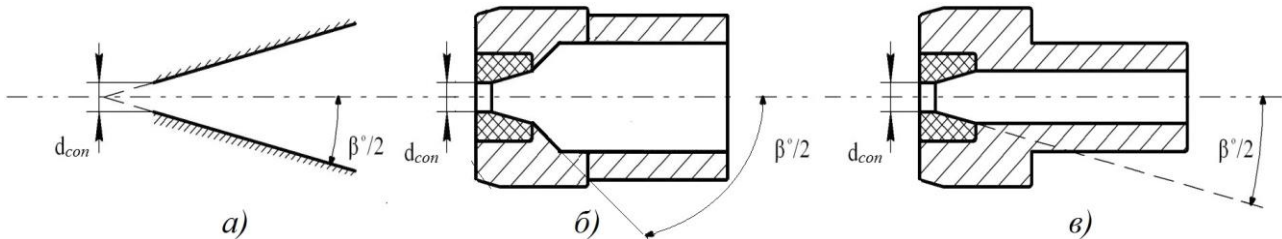


Рис. 15. Поперечний розріз вхідної ділянки соплової частини гідрорізальної струменеформуючої голівки: а) – схема сопла; б) – сопло МОВПС-100; в) – сопло УКГ-3020

З гідромеханіки відомий розв'язок рівняння руху ньютонівської рідини в конфузурі. Для повздовжнього градієнта швидкості у вхідній ділянці сопла для

не занадто великих $\beta^\circ \left(\beta^\circ < \frac{\pi}{2} \right)$ можна записати вираз:

$$\dot{\varepsilon} \approx 2Q \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta^\circ}{2} / A \cdot d_{\text{соп}}, \quad (13)$$

де Q – швидкість витікання розчину полімеру, м³/с; A – коефіцієнт проникливості сопла, м²; $d_{\text{соп}}$ – діаметр сопла, м; β° – кут, відлічуваний вказаним на рис. 15 чином, рад.

Враховуючи вище наведене, умова формування динамічних надмолекулярних структур у водних розчинах ПЕО при їх витіканні з сопла, яка повинна виконуватися при проектуванні конфігурації (форми) сопла гідрорізальної струменеформуючої голівки, має вигляд за $[\eta]_0 \cdot C_{\text{ПЕО}} \leq 1$:

$$\frac{\theta_0 \exp \{([\eta]_0 \cdot C_{\text{ПЕО}})\} \cdot 2Q \cdot \operatorname{tg}(\beta^\circ / 2)}{d_{\text{соп}}^3} \geq \operatorname{De}_{\text{кр}}, \quad \text{при } \beta^\circ < \frac{\pi}{2}. \quad (13)$$

Оскільки критичне число Дебора визначається експериментально, то $A \cdot d_{\text{соп}}$ замінили на $d_{\text{соп}}^3$. Відповідно до отриманих експериментальних даних, критичне число Дебора прийнято рівним 1,0. Зі співвідношення (13) випливає, що прояв аномально високої різальної здатності водополімерного струменя при $u \geq u_{\text{кр}}$ збільшується зі збільшенням кута входу в сопло, швидкості струменя, концентрації і молекулярної маси ПЕО.

В цьому ж розділі наведені результати чисельного аналізу збіжної течії в'язкопружної рідини Максвелла, які підтверджують уявлення, отримані з експериментального вирішення питання про деформаційно-напружений стан розчинів ПЕО під час протікання крізь сопло і дають підстави запропонувати метод розрахунку повздовжнього градієнта швидкості.

Отримане концептуальне рішення конструкції машини для універсального різання харчових продуктів водополімерним струменем в режимі 3D з можливістю утворення різної конфігурації поверхні розрізів харчової сировини за умов енергоресурсозбереження та забезпечення вимог щодо екологічності виробництва дозволило розробити проектно-технічну документацію на машину МОВПС-100. За рахунок реалізації процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем вдалося знизити робочий тиск в 4–5 разів у порівнянні з тиском при різанні водяним струменем, а це дало підстави запропонувати універсальну гідрорізальну в режимі 3D машину МОВПС-100, зображену на рис. 16, з вартістю в 10 разів меншою, ніж вартість існуючого гідрорізального обладнання.

Дослідний зразок машини МОВПС-100 пройшов промислову апробацію. Отримано максимальну (наскрізну) глибину розрізу 0,4 м зразка яловичини за температури -25 °С, $\Delta P_0 = 100$ МПа, $d_{\text{соп}} = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м, $V_{\text{п,с}} = 25 \cdot 10^{-3}$ м/с, $M_{\text{ПЕО}} = 6 \cdot 10^6$, $C_{\text{ПЕО}} = 0,002\%$. Встановлено, щоб досягти однакової глибини різання заморожених харчових продуктів (в діапазоні від -3 °С до -25 °С) достатньо тиску водополімерного струменя лише 45–65% від тиску водяного струменя, і навпаки, за однакового початкового тиску спостерігається збільшення глибини

і швидкості різання водополімерним струменем в 1,5–2,5 рази, що свідчить про особливий механізм його взаємодії з харчовим продуктом.

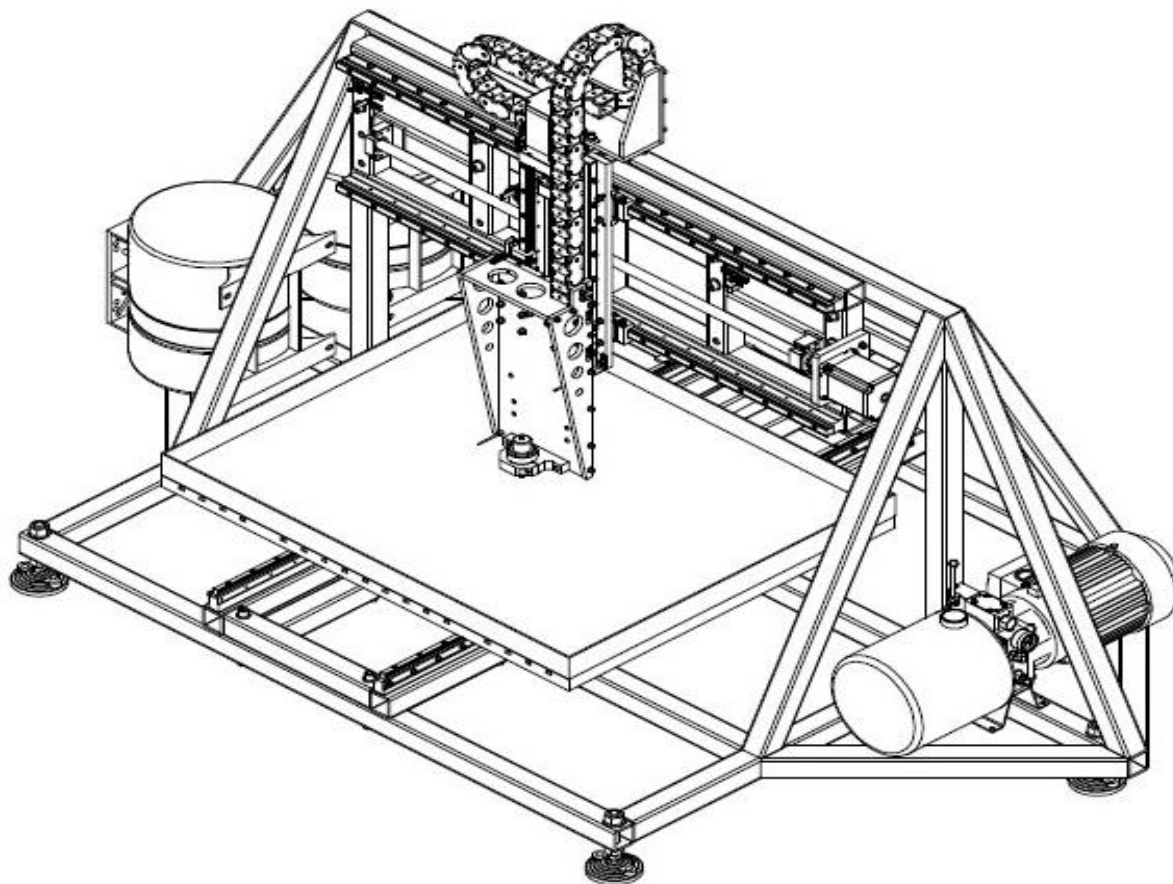


Рис. 16. Машина МОВПС-100 для різання харчових продуктів водополімерним струменем

Доведена можливість комп'ютерного управління процесом різання харчових продуктів водополімерним струменем, що уможливорює здійснювати їх різання в режимі 3D з можливістю утворення різної конфігурації поверхні розрізів харчової сировини. Гідрорізальна струменеформуюча голівка за допомогою сервоприводів переміщається в трьох напрямках, ріжучи харчовий продукт з різних боків. При цьому можна отримувати розрізи будь-якої складності, у будь-якому місці із запрограмованою зміною параметрів гідрорізання харчового продукту. Це дозволить, наприклад, традиційну роботизовану лінію первинної обробки – конвеєр – зменшити до однієї (чи декількох) обробних точок, в яких гідрорізальна струменеформуюча голівка робитиме одночасно декілька операцій.

Отримані дані свідчать про те, що процес різання харчових продуктів водополімерним струменем є екологічно безпечним, на 60% менш енергоємним порівняно з різанням струменем води, що підвищує ресурс обладнання та забезпечує ресурсозбереження (за рахунок зростання ресурсу і зменшення ширини розрізу сировини) більш ніж на 25%. Тобто він є

енергоресурсозберігаючим, екологічним за визначенням. Економічний ефект від впровадження склав 458 тис. грн. за рахунок суттєвого зменшення вартості МОВПС-100. Дослідницько-промислова апробація МОВПС-100 підтвердила практичну і економічну доцільність використання МОВПС-100 для водополімерного різання харчових продуктів, особливо глибокого заморожування.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі виконаних автором досліджень сформульовані і обґрунтовані наукові положення, сукупність яких є *новий напрям досліджень* – науково-теоретичні основи процесу різання харчових продуктів водополімерними струменями з поліпшеними динамічними параметрами, що уможливує застосування водополімерного гідрорізання в режимі 3D за умов енергоресурсозбеження та забезпечення вимог щодо екологічності виробництва.

1. Встановлені закономірності реофізичної поведінки розчинів ПЕО при витіканні з сопла гідрорізальної струменеформуючої голівки, що полягають в спостережуваному динамічному структуроутворенні, обумовленому виникненням високого ступеня молекулярної організації за наявності негативних зворотних зв'язків. Це дозволило висунути, а потім експериментально довести гіпотезу про можливий вплив виявлених ефектів пружних деформацій, що проявляються у вхідній ділянці сопла гідрорізальної струменеформуючої голівки, на аномально високу різальну здатність водополімерного струменя.

2. Експериментально отримані дані стосовно динаміки лінійних макромолекул у вхідній ділянці сопла гідрорізальної струменеформуючої голівки, що дало змогу довести наявність суттєвої (60–70%) деформаційної дії гідродинамічного поля на макромолекулярні клубки ПЕО і, як наслідок, прояв значних деформаційних ефектів при протіканні водних розчинів ПЕО крізь струменеформуючу голівку.

3. Отримані нові дані про вплив різних за конструкцією гідрорізальних струменеформуючих голівок на особливості гідродинамічної поведінки водних розчинів ПЕО під час їх протікання крізь голівку та встановлені закономірності впливу динамічних структур, що утворюються, на ефективність різання харчових продуктів водополімерним струменем. Встановлено, що глибина розрізу у харчовому продукті досить різко зростає зі збільшенням концентрації та молекулярної маси ПЕО і досягає максимуму за деяких оптимальних концентрацій. Для ПЕО з молекулярною масою $3 \cdot 10^6$ оптимальна концентрація дорівнює 0,015–0,020%, а для ПЕО з молекулярними масами $4 \cdot 10^6$ і $6 \cdot 10^6$ – 0,007–0,010% і 0,0015–0,0020% відповідно. Щоб досягти однакової глибини різання заморожених харчових продуктів (в діапазоні від -3 °C до -25 °C), достатньо тиску водополімерного струменя лише 45–65% від тиску водяного струменя, і навпаки, за однакового початкового тиску спостерігається

збільшення глибини і швидкості різання водополімерним струменем в 1,5–2,5 рази, що свідчить про особливий механізм його взаємодії з харчовим продуктом.

4. Отримано розрахункову залежність, яка дозволяє визначати оптимальну відстань до поверхні харчового продукту від зрізу сопла, за якої спостерігається максимальна глибина розрізу водополімерним струменем, а також функціональну залежність раціональної швидкості переміщення водополімерного струменя від його динамічних параметрів, діаметра сопла, міцності харчового продукту, концентрації і молекулярної маси полімеру.

5. Встановлено розрахункову залежність довжини початкової ділянки, яка характеризує якість формування водополімерного струменя, від концентрації, молекулярної маси ПЕО, параметрів сопла та підвідного каналу, а також залежність діаметра водополімерного струменя по його довжині, яка дозволяє визначати діаметр струменя на різних відстанях від зрізу сопла з урахуванням якості його формування, що є функцією часу релаксації водних розчинів ПЕО.

6. З'ясовано молекулярно-надмолекулярний механізм різання харчових продуктів водополімерним струменем. Так, механізм аномально високої різальної здатності водополімерного струменя не обумовлений ефектом Томса, а полягає в руйнівній дії динамічного тиску водополімерного струменя, «армованого» сильно розгорнутими макромолекулярними ланцюгами та динамічними надмолекулярними структурами, що утворюються під дією розтягуючої течії у вхідній ділянці сопла струменеформуючої голівки.

7. Розроблено математичну модель процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем, яка описує вплив міцності продукту та відстані до його поверхні від зрізу сопла, гідравлічних і динамічних параметрів водополімерного струменя, швидкості переміщення струменя, а також концентрації і молекулярної маси полімеру на глибину різання харчового продукту.

8. Теоретично обґрунтована і експериментально доведена можливість суттєвого підвищення різальної здатності водополімерного струменя в осцилюючому режимі його формування, що впливає з теорії ефектів пружних деформацій. Витікання водного розчину ПЕО з сопла гідрорізальної струменеформуючої голівки повинне відбуватися в осцилюючому режимі при появі пружних деформацій, а частота пульсаційної дії на водополімерний потік повинна відповідати максимуму дисипативної функції.

9. Розроблено науково обґрунтовані принципи проектно-розрахункових опрацювань обладнання для різання харчових продуктів водополімерним струменем в режимі 3D за умов енергоресурсозбеження та забезпечення вимог щодо екологічності виробництва. Розрахунок режимів протікання водополімерного розчину крізь гідрорізальну струменеформуючу голівку ґрунтується на використанні встановленого критерію, що характеризує початок виникнення динамічного структуроутворення у водополімерних розчинах при їх протіканні крізь сопло гідрорізальної струменеформуючої голівки, а також

рекомендацій з оптимізації процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем.

10. Розроблено концептуальне рішення конструкції машини для універсального різання харчових продуктів водополімерним струменем в режимі 3D з можливістю отримання різної конфігурації поверхні розрізів харчової сировини за умов енергоресурсозбереження. Отримані рекомендації з оптимізації процесу гідроструминного водополімерного різання заморожених харчових продуктів, реалізація яких знижує раціональний робочий тиск у 4–5 разів в порівнянні з тиском при різанні водяним струменем, а це дозволило запропонувати універсальну гідрорізальну в режимі 3D машину МОВПС-100 вартістю в 10 разів меншою, ніж вартість існуючого гідрорізального обладнання. Дослідницько-промислова апробація МОВПС-100 підтвердила, що процес різання харчових продуктів водополімерним струменем є екологічно безпечним, на 60% менш енергоємним і на 25% більш ресурсозберігаючим порівняно з різанням струменем води.

11. Проведене оцінювання економічної ефективності процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем підтвердило його перспективність. Результати роботи впроваджено (продано ліцензію на використання Know-How та технічну документацію для виробництва машини МОВПС-100) на ТОВ «Черкесск». Розрахунковий економічний ефект склав 458 тис. грн. Результати дисертації впроваджено також у навчальний процес ІФНТУНГ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Заплетников И.Н., Гордиенко А.В., Погребняк А.В. Оборудование гидрорезания пищевых продуктов: монография / Донец. нац. ун-т эконом. и торг. им. М. Туган-Барановского Донецк: ДонНУЭТ им. М. Туган-Барановского, 2012. 207 с. *Внесок здобувача: проведення експерименту з розрізання замороженого фаршу та філе риби хека гідроструменем і узагальнення даних про вплив на процес різання 2-х різних за конструкцією струменеформуєчих голівок, участь в обґрунтуванні перспективності використання гідроструменів для різання харчових продуктів.*

2. Інноваційні підходи до поліпшення експлуатаційних характеристик обладнання харчових виробництв: монографія / І.М. Заплетніков, А.М. Поперечний, Д.О. Єрьоменко, А.В. Погребняк та ін. Донецьк: Knowledge, 2013. 290 с. *Внесок здобувача: проведення експериментів з гідрорізання харчових продуктів і обґрунтування перспективності використання гідроструменів для різання харчових продуктів.*

3. Погребняк А.В. Сходящееся течение растворов полимеров; Деградация водных растворов полимеров; Гидродинамический расчет камер и дросселирующих устройств // Энергосбережение и эффект Томса: монография / Под ред. проф. Ю.Ф. Иванюты. Киев: «Освіта України», 2017. 440 с. С. 118–204; С. 205–218; С. 350–360.

4. Погребняк А.В., Пономаренко Е.В. Інтенсифікація процесу гідроабразивного різання замороженого м'яса // Наукові праці / Одеська. нац. акад. харч. технол. 2012. Вип. 41. Т. 2. С. 163–166. *Внесок здобувача: постановка завдання дослідження, розробка способу формування гідроабразивного струменя, участь у проведенні експерименту.*

5. Заплетніков І.М., Погребняк А.В., Наумчук М.В. Вплив міцності замороженого м'яса на процес різання гідроструменем // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. пр. / Донец. нац. ун-т економ. і торг. ім. М. Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2012. Вип. 28. С. 119–125. *Внесок здобувача: розроблення спеціальних стендів з термостатуванням і стабілізацією температури (до -40°C), проведення експерименту з впливу мінусових температур на твердість, граничне напруження зрізу і межу міцності при одновісному стисканні харчових продуктів.*

6. Погребняк А.В., Пономаренко Е.В. Інтенсифікація процесу гидрорезання // Рибне господарство України. 2012. Вип. 7. С. 30–33. *Внесок здобувача: аналіз і узагальнення експериментальних даних.*

7. Погребняк А.В., Перкун І.В. Фізичний механізм гідроструминного розрізання харчових продуктів глибокого замороження та якість розрізу // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Х.: ХДУХТ, 2013. Вип. 1 (17). Т. 1. С. 196–202. *Внесок здобувача: участь в проведенні експерименту, обґрунтування фізичного механізму різання харчових продуктів гідроструменем.*

8. Погребняк А.В., Перкун І.В., Погребняк В.Г. Параметри флокуляційного процесу, що забезпечують підвищення властивостей та якість харчових продуктів // Товарознавчий вісник: зб. наук. пр. / Луц. нац. техн. ун-т. Луцьк: ЛНТУ, 2013. Вип. 6. С. 205–212. *Внесок здобувача: розробка і виготовлення експериментального стенду, участь в обґрунтуванні технології очищення рідин полімерними флокулянтами.*

9. Pogrebnyak A.V., Perkun I.V., Pogrebnyak V.G. Operation efficiency increase of systems at food enterprises // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. пр. / Донец. нац. ун-т економ. і торг. ім. М. Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2013. Вип. 31. С. 93–100. *Внесок здобувача: проведення експерименту, участь в аналізі експериментальних даних та в узагальненні результатів.*

10. Погребняк А.В., Пономаренко Е.В. Обґрунтування раціональних параметрів різання харчових продуктів трикомпонентним гідроструменем // Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. пр. / Донец. нац. ун-т економ. і торг. ім. М. Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2013. Вип. 30. С. 376–381. *Внесок здобувача: участь в проведенні експерименту, обґрунтування раціональних параметрів гідрорізання харчових продуктів.*

11. Pogrebnyak A.V., Ivanyuta Yu.F. Peculiarities of polyethyleneoxide

solution streaming through jet-shaping head while cutting foodstuffs // *Обладнання та технології харчових виробництв: зб. наук. пр. / Донец. нац. ун-т економ. і торг. ім. М. Туган-Барановського. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2014. Вип. 32. С. 50–59. Внесок здобувача: моделювання умов вхідної ділянки сопла, проведення експерименту з виявлення особливостей протікання водних розчинів ПЕО в модельних соплах гідrorізальної голівки.*

12. Погребняк А.В., Иванюта Ю.Ф. Резко сходящееся течение раствора полимера // *Математичне моделювання. 2014. № 1 (30). С. 66–71. Внесок здобувача: участь в постановці завдання дослідження, розробка алгоритму розрахунку полів швидкості і їх градієнтів, а також розподілу різниці нормальних напружень під час витікання в'язкопружної рідини крізь сопло струменеформуючої голівки.*

13. Дейниченко Г.В., Погребняк А.В. Гідроструминне водополімерне розрізання заморожених харчових продуктів // *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Х.: ХДУХТ, 2015. Вип. 1 (19). Т. 1. С. 94–103. Внесок здобувача: проведення експерименту з встановлення особливості взаємодії водополімерного струменя із замороженим харчовим продуктом, обґрунтування гіпотези про вплив ефектів пружних деформацій на високу різальну здатність водополімерного струменя і експериментальне її підтвердження та участь в узагальненні отриманих результатів.*

14. Perkun I.V., Pogrebnyak A.V. Displacement of Fluids from Porous Bed by the Oscillating Flow of Polymer Solution // *American Journal of Science, Engineering and Technology. 2016. Vol. 1. No 2. Pp. 53–57. Стаття у виданні **Сполучених Штатів Америки**. Внесок здобувача: теоретичне обґрунтування підвищеної ефективності розчину полімеру в осцилюючому режимі протікання.*

15. Pogrebnyak A.V., Perkun I.V., Pogrebnyak V.G. Degradation of Polymer Solutions in a Hydrodynamic Field with a Longitudinal Velocity Gradient // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. Vol. 90. No 5. Pp. 1219–1224. Стаття у виданні **Сполучених Штатів Америки**, яке включено до **SCOPUS**. Внесок здобувача: участь в постановці завдання дослідження, проведення експерименту з впливу гідродинамічного поля на молекулярну масу ПЕО з використанням світлорозсіювання, участь в побудові схеми процесу деградації водних розчинів полімерів.*

16. Pogrebnyak A., Pogrebnyak V. Mechanism of the High Efficiency of the Cutting Frozen Food Products Using Water-jet with Polymer Additions // *Харчова наука і технологія. 2017. Т. 11. № 2. С. 73–78. Стаття у фаховому виданні **України**, яке включено до **WEB OF SCIENCE**. Внесок здобувача: проведення експерименту з виміру полів швидкості і їх градієнтів, а також ступеня розгорнутості макромолекул під час течії розчинів ПЕО в умовах струменеформуючої голівки, участь в експериментально-теоретичному обґрунтуванні механізму високої ефективності різання харчових продуктів водополімерним струменем.*

17. Pogrebnyak A., Pogrebnyak V. Peculiarities of the Hydro-jet Water-

polymer Processing of Food Products by Cutting // World Journal of Food Science and Technology. 2017. Vol. 1. No 1. Pp. 28–31. **Стаття у виданні *Сполучених Штатів Америки*. Внесок здобувача: проведення поляризаційно-оптичної візуалізації течії розчинів полімеру в умовах гідрорізальної голівки, участь в узагальненні висновків.**

18. Дейниченко Г.В., Погребняк А.В. Природа аномально високої ефективності процесу гідроструминної водополімерної обробки харчових продуктів різанням // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. Х.: ХДУХТ, 2017. Вип. 1 (23). Т. 1. С. 118–132. **Стаття у фаховому виданні *України*, яке включено до міжнародних наукометричних баз. Внесок здобувача: участь у постановці завдань дослідження, проведення експериментів, що довели наявність структуроутворення в розчинах ПЕО під дією гідродинамічного поля, участь у розробці концепції природи аномально високої різальної здатності водополімерного струменя.**

19. Погребняк А.В. Дослідження процесу гідроструминної водополімерної обробки харчових продуктів різанням // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького. Серія: Харчові технології. 2017. Т. 19. № 75. С. 134–139. **Стаття у фаховому виданні *України*, яке включено до міжнародних наукометричних баз.**

20. Pogrebnyak A.V., Pogrebnyak V.G. Hydrocutting of Frozen Food Products // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. 2017. Vol. 3. No. 1. Pp. 1–8. **Стаття у фаховому виданні *України*, яке включено до міжнародних наукометричних баз. Внесок здобувача: проведення експерименту з виявлення динаміки лінійних макромолекул у вхідній ділянці сопла гідрорізальної струменеформуючої голівки, участь в розробці концептуального рішення конструкції машини для універсального різання харчових продуктів водополімерним струменем.**

21. Погребняк А.В. Расчет параметров струеформирующей головки для водополимерной обработки материалов резанием // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України: зб. наук.-техн. пр. / Нац. лісотехн. ун-т України. Л.: НЛТУ України, 2017. Вип. 27 (3). С. 187–190. **Стаття у фаховому виданні *України*, яке включено до міжнародних наукометричних баз.**

22. Погребняк А.В. Динамические характеристики тонкой высокоскоростной водополимерной струи // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки: зб. наук. пр. / Приазовськ. держ. техн. ун-т. Маріуполь: ПДТУ, 2017. Вип. 34. С. 112–118. **Стаття у фаховому виданні *України*, яке включено до міжнародних наукометричних баз.**

23. Kryvenko G., Pogrebnyak A., Perkun I. The Nature of Hydrodynamic Drag Reduction of Fluid Flow in Pipelines by Polymer Additions // Science and Engineering. 2017. Vol. 2. No 3. Pp. 79–85. **Стаття у виданні *Сполучених***

Штатів Америки. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, обґрунтування механізму ефекту Томса, участь в узагальненні висновків.*

24. Погребняк А.В. Исследовательско-промышленная апробация водополимерной гидрорежущей установки // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України: зб. наук. пр. / Нац. лісотехн. ун-т України. Л.: НЛТУ України, 2017. Вип. 27 (4). С. 133–136. **Стаття у фаховому виданні України, яке включено до міжнародних наукометричних баз.**

25. Pogrebnyak A., Pogrebnyak V. The Elastic Deformations and Anomalous High Cutting Ability of a Polymer Solution Jet // Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. 2017. № 1 (85). Pp. 89–94. *Внесок здобувача: проведення експерименту з динамічного структуроутворення в розчинах ПЕО, участь в узагальненні даних з реофізичної поведінки розчинів ПЕО при витіканні з сопла гідрорізальної струменеформуючої голівки.*

26. Погребняк А.В. Структурно-гидродинамические параметры водополимерной струи // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2017. № 1 (42). С. 54–60.

27. Погребняк А.В., Погребняк В.Г. Особенности процесса гидроструйной обработки пищевых продуктов резанием // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: зб. наук. пр. / Таврійськ. держ. агротехнол. ун-т. Мелітополь: ТДАТУ, 2017. Вип. 17. Т. 1. С. 184–194. *Внесок здобувача: проведення експерименту, участь в обґрунтуванні природи аномально високої різальної здатності гідроструменя з полімерними домішками.*

28. Водополімерний спосіб різання заморожених харчових продуктів та матеріалів: пат. на корисну модель № 74609, Україна. МПК В 03 В 4/00 // Погребняк А.В., Наумчук М.В.; № u201202142; заявл. 24.02.12; опубл. 12.11.12, Бюл. № 21. 4 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь в розробці концептуального рішення її реалізації.*

29. Спосіб відділення м'яса від кістки гідроструменем: пат. на корисну модель № 78305, Україна. МПК А 22 С 17/40 // Погребняк А.В., Наумчук М.В., Пономаренко Е.В.; № u201211600; заявл. 08.10.12; опубл. 11.03.13, Бюл. № 5. 3 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь в експериментальній перевірці запропонованого способу.*

30. Спосіб різання харчових продуктів високошвидкісним гідроструменем: пат. на корисну модель № 74608, Україна. МПК В 03 В 4/00 // Погребняк А.В., Наумчук М.В., Пономаренко Е.В.; № u201202141; заявл. 24.02.12; опубл. 12.11.12, Бюл. № 21. 4 с. *Внесок здобувача: ідея винаходу та участь в експериментальному підтвердженні запропонованого способу.*

31. Спосіб різання харчових продуктів трифазним струменем рідини: пат. на корисну модель № 78304, Україна. МПК В 23 D 31/00, В 24 С 1/00 // Погребняк А.В., Наумчук М.В., Пономаренко Е.В.; № u201211599; заявл. 08.10.12; опубл. 11.03.13, Бюл. № 5. 3 с. *Внесок здобувача: участь в експериментальному підтвердженні запропонованого способу.*

32. Погребняк А.В. Экспериментально-теоретичне доведення підвищення різальної здатності осцилюючого водополімерного струменя // Науково-технічна творчість молодих вчених з процесів і обладнання харчових виробництв: Міжнар. наук.-практ. конф., 25-26 жовтня 2012 р.: тези доп. Донецьк: ДонНУЕТ ім. М. Туган-Барановського, 2012. С. 61.

33. Погребняк А.В., Перкун И.В. Оценка качества боковой поверхности в мясе при гидроструйном разрезании // Современная торговля: теория, практика, перспективы развития: II Междунар. иннов. научн.-практ. конф., 15 марта 2013 г.: материалы. М.: Москов. гуманит. ун-т, 2013. Ч. 2. С. 244–248. *Внесок здобувача: ідея способу оцінки якості поверхні розрізів харчового продукту водополімерним струменем, участь в аналізі отриманих експериментальних даних.*

34. Pogrebnyak A.V. Structure Formation in Polymer Solution Streaming Through Jet-shaping Head While Cutting Foodstuffs // Техника и технология пищевых производств: IX Междунар. научн.-техн. конф., 24–25 апреля 2014 г.: тезисы докл. Могилев: УО МГУП, 2014. Ч. 2. С. 41.

35. Погребняк А.В. Гидроструйная обработка пищевых продуктов // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: Міжнар. наук.-практ. конф., 8–11 вересня 2015 р.: тези доп. Харків-Мелітополь: ХДУХТ, ТДАТУ, 2015. С. 14–19.

36. Погребняк А.В., Перкун И.В., Погребняк В.Г. Исследовательско-промышленная апробация водополимерной гидрорежущей пищевые продукты установки // Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності: II Міжнар. наук.-практ. конф., 5–7 вересня 2017 р.: тези доп. Харків-Мелітополь: ХДУХТ, ТДАТУ, 2017. С. 85–86. *Внесок здобувача: проведення дослідницько-промислової апробації, участь в узагальненні результатів.*

АНОТАЦІЯ

Погребняк А.В. Науково-теоретичні основи процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем та розробка обладнання для його реалізації. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Харківський державний університет харчування та торгівлі Міністерства освіти і науки України, Харків, 2018.

Робота присвячена розробці науково-теоретичних основ процесу різання харчових продуктів водополімерним струменем та обладнання для універсального водополімерного різання в режимі 3D за умов енергоресурсозбереження і забезпечення вимог щодо екологічності виробництва. Отримані нові дані про вплив різних за конструкцією гідрорізальних струменеформуючих голівок на особливості гідродинамічної поведінки водних розчинів поліетеленоксида під час їх протікання крізь голівки та встановлені

закономірності впливу динамічних структур, що утворюються, на ефективність різання харчових продуктів водополімерним струменем.

Комплексне вивчення особливостей різання харчових продуктів водополімерним струменем дозволило розробити математичну модель процесу водополімерного різання харчових продуктів. З'ясовано молекулярно-надмолекулярний механізм різання харчових продуктів водополімерним струменем. Розроблено концептуальне рішення конструкції машини для універсального різання харчових продуктів водополімерним струменем в режимі 3D з можливістю отримання різної конфігурації поверхні розрізів харчової сировини за умов енергоресурсозбеження. Дослідницько-промислова апробація МОВПС-100 підтвердила, що процес різання харчових продуктів водополімерним струменем є екологічно безпечним, на 60% менш енергоємним і на 25% більш ресурсозберігаючим порівняно з різанням струменем води.

Ключові слова: харчові продукти, різання, водополімерний струмінь, розчин полімеру, поліетиленоксид, деформаційні ефекти, структуроутворення, сопло, струменеформуєча голівка.

АННОТАЦІЯ

Погребняк А.В. Научно-теоретические основы процесса резания пищевых продуктов водополимерной струей и разработка оборудования для его реализации. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. – Харьковский государственный университет питания и торговли Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2018.

Работа посвящена разработке научно-теоретических основ процесса резки пищевых продуктов водополимерной струей и оборудования для универсального водополимерного резания в режиме 3D в условиях энергоресурсозбежения и обеспечения требований по экологичности производства. Получены новые данные о влиянии различных по конструкции гидрорезальных струеформирующих головок на особенности в гидродинамическом поведении водных растворов полиэтиленоксида при их протекании через головки и установлены закономерности влияния образующихся динамических структур на эффективность резки пищевых продуктов водополимерной струей.

Комплексное изучение особенностей резки пищевых продуктов водополимерными струями позволило разработать математическую модель процесса водополимерной резки пищевых продуктов. Установлен молекулярно-надмолекулярный механизм гидроструйной водополимерной резки пищевых продуктов. Разработано концептуальное решение конструкции машины для универсальной резки пищевых продуктов водополимерной струей в режиме 3D с возможностью получения разной конфигурации поверхности

разрезов пищевого сырья в условиях энергоресурсосбережения. Опытнo-промышленная апробация опытного образца МОВПС-100 подтвердила, что процесс резки пищевых продуктов водополимерной струей является экологически безопасным, на 60% менее энергоемким и на 25% более ресурсосберегающим по сравнению с резаньем струей воды.

Ключевые слова: пищевые продукты, водополимерная струя, раствор полимера, полиэтиленоксид, деформационные эффекты, структурообразование, резка, сопло, струеформирующая головка.

ANNOTATION

Pogrebnyak A.V. Scientific and Theoretical Bases of the Process of Hydro-jet Water-polymer Cutting of Food Products and Development of Equipment for its Implementation. – Manuscript.

Dissertation for the Doctor's Degree of Technical Sciences by Specialty 05.18.12 – Processes and Equipment of Food, Microbiological and Pharmaceutical Industries. – Kharkiv State University of Food Technology and Trade of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The work is dedicated to the development of scientific and theoretical bases of the process of hydro-jet water-polymer cutting of food products and equipment for its implementation.

The peculiarities of the flow of an aqueous solution of polyethylene oxide (PEO) through the nozzle of the jet forming head and the structure of the hydrodynamic field in the inlet region of the nozzle are established. The problem of the dynamics of PEO molecules in the inlet region of the nozzle of the hydro-cutting jet head is solved, and the nature of the dynamic structure formation during the course of the PEO solution flow through the hydro-cutting jet-forming head is clarified.

The results of studies of the influence of geometric and dynamic parameters of a water-polymer jet on the indices of the process of hydro-cutting food products are described (frozen chicken fillet, hoki fish, pork and beef at different temperatures). The problem of the structure of the water-polymer jet from the moment of its formation in the air to the degeneration into a drop stream under different flow conditions, concentrations and molecular weights of polymer additives is solved, as well as the degree of force action of the water-polymer spray on the obstacle along the flow axis.

It is established that the rational parameters of the hydro-cutting jet forming head are determined by the nozzle diameter and the length of the initial section of the water-polymer jet, which is a function of the concentration and molecular weight of the polymer and which characterizes the quality of the formation of the water-polymer jet. The calculated dependences of the length of the initial section of a high-speed water-polymer jet on the relaxation time of aqueous solutions of PEO and the quality of nozzle etching, the feed channel and their parameters, and the calculated dependence of the diameter of water-polymer jets along their length, allowing

determination of the diameter of the water-polymer jet at various distances from the nozzle cut quality of its formation. To substantiate and choose the criterion of resistance to hydro-jet water-polymer processing of various frozen food products, the effect of various indices of the physical and mechanical properties of the frozen flick of the broiler hoki fish, pork and beef at different temperatures on the cutting process was studied.

Using a generalized analysis of experimental data, methods of the theory of similarity and dimensions, and methods of probability theory and mathematical statistics, a calculated dependence was obtained in dimensionless form to determine the depth of cut in food products, taking into account their strength in uniaxial compression, the optimum distance between the nozzle cut and the surface of food product, nozzle diameter, as well as the hydraulic and regime parameters of the water-polymer jet, the velocity of the jet and the quality of its formation. An important feature of this equation is that it takes into account the quality of the formation of a water-polymer jet, which is a function of the molecular weight of the polymer and its concentration in solution. The peculiarities of the influence of the main parameters of hydro-cutting by a water-polymer jet of food products on the rate of increment and the quality of the lateral surface of the section are revealed.

The generalization of the experimental results obtained made it possible to establish a mechanism for hydro-jet water-polymer cutting of food products, consisting of the destructive action of the dynamic pressure of the water-polymer jet "reinforced" by strongly deployed macromolecular chains and dynamic supermolecular structures formed by the effect of the stretching flow in the inlet region of the nozzle of the jet head.

Scientifically substantiated principles of design and calculation of devices for hydro-jet water-polymer cutting of food products have been developed. Criteria are obtained that determine the conditions for the expedient use of polymer additives in water during hydro-jet cutting of food products. The influence of the effects of elastic deformations on the value of the anomalously high cutting capacity of a water-polymer jet for nozzles of a jet-forming head with different entrance angles is investigated.

The calculation of the flow regimes of the water-polymer solution through the elements of the hydro-cutting jet-forming head is based on the use of the established criterion characterizing the onset of the onset of dynamic structure formation in water-polymer solutions during their flow through the nozzle of the hydro-cutting jet head. Consideration of the problem of the flow of a Newtonian liquid (water) in the input region of the nozzle of the jet-forming head and the numerical analysis of the flow of an elastically viscous liquid (polymer solution) through a nozzle made it possible to justify the method of calculating the longitudinal velocity gradient in the input region of the jet-forming element elements.

The formulated scientifically grounded principles of design calculations of equipment for hydro-jet water-polymer cutting of food products and practical recommendations for improving the process of water-polymer cutting of food

products allowed developing a design and technical documentation on the machine MPWPJ-100 for processing water-polymer jet of food products.

The practical importance of the work was confirmed by 4 patents of Ukraine, the 2 acts of implementing the results of work, the license agreement, as well as the results of the research and industrial approbation of the experienced sample MPWPJ-100, which confirmed the expediency and cost-effectiveness of using the process of water-polymer cutting of food products.

Keywords: Water-polymer Cutting, Food Products, High Velocity Jet, Polymer Solution, Polyethyleneoxide, Deformation Effects, Structure Formation, Cutting Width, Jet-forming Nozzle.

Видавництво Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна
тел. (03422) 42453, факс (03422) 42139,
<http://nung.edu.ua>, e-mail: public@nung.edu.ua
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців
ІФ № 18 від 12.03.2002 р.

Підписано до друку 18.05.2018 Формат 60x84¹/16 Папір офсетний
Ум. друк. арк. 2,27 Тираж 130 прим. Замовл. № 65