

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

На правах рукопису

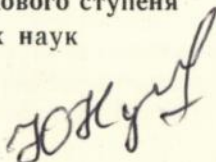
КУЯНОВ Юрій Юрійович

УДК 664.292.011

**ГІДРОЛІЗ ПЕКТИНОВИХ РЕЧОВИН ІЗ ЯБЛУЧНОЇ  
СИРОВИНИ З ВИКОРИСТАННЯМ НВЧ-ЕНЕРГІЇ**

**05.18.12 — процеси і апарати харчових виробництв**

**А в т о р е ф е р а т**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук




663.1  
661.12

AB 36.774

Дисертацією є рукопис  
Роботу виконав  
харчових технологій  
Науковий керівник:

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00760928 (W)

Корсунчик Микола Сергійович

кандидат технічних наук, доцент  
Сороколіт Микола Іванович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Купчик Михайло Петрович  
кандидат технічних наук, старший  
науковий співробітник  
Сегай Олександр Михайлович

Провідна організація: Інститут технічної теплофізики  
НАН України/ м.Київ/

Захист дисертації відбудеться 12 лютого 1997 р.  
о 14 годині в аудиторії А-311 на засіданні спеціаліза-  
ваної вченої ради Д 01.15.04 Українського державного уні-  
верситету харчових технологій за адресою: 252017, м.Київ,  
вул. Володимирська, 68.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці УДУХТ.  
Автореферат розіслано "10" 01 1997 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук, доцент



Зав'ялов В.Л.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. У зв'язку із складними екологічними умовами в багатьох регіонах України і країнах СНД поряд з традиційним використанням пектину в кондитерській та харчовій промисловості питанням сьогодення стає виробництво пектину для лікування й профілактики населення. Це пов'язано з властивістю пектину утворювати комплекси ополуки з іонами важких металів, що сприяє виведенню радіонуклідів з організму і позитивному біологічному впливу на людину. При профілактичній нормі 3-4 грами пектину в день потреба його для населення України дорівнює 30 тисячам тонн на рік. Проблема виробництва пектину і продуктів, які містять пектинові речовини, як визначено в Указі Президента України "Про Національну програму "Діти України" (Київ, 18 грудня 1996 р., N 63/96), стала національною.

Розповсюдження та можливість збільшення потужностей виробництва пектину стримуються недосконалістю існуючої технології, яка потребує складного паро-, водо-, повітряного забезпечення і значних витрат хімічних реагентів для здійснення технологічних операцій, а також виготовлення технічного обладнання в термо- і кислотостійкому виконанні. Це стимулює розробку нових технологій вилучення пектину із рослинної сировини і пошук шляхів підвищення ефективності операцій, які дорого коштують, зокрема таких як кислотний термогідроліз.

Відомі науковці нашої країни та за її межами здійснюють пошуки нових хімічних реагентів для вдосконалення технології кислотного термогідролізу. Крім того, відомі дослідження, які спрямовані на інтенсифікацію цього процесу за рахунок використання додаткових впливів різноманітних фізичних полів, наприклад, накладення на сировину в процесі гідролізу механічних коливань, електричного струму, опромінювання тощо. У цьому напрямку можливості використання НВЧ електромагнітного діапазону радіохвиль для спрямованого поліпшення технологічних характеристик процесу гідролізу протопектину з яблучного жому залишаються не визначеними.

Враховуючи останні досягнення у виробництві пектину з яблучного жому та існуючий досвід використання НВЧ-нагрівання у харчовій промисловості, питання інтенсифікації технологічних процесів вилучення пектину з використанням НВЧ-енергії є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору.

Л. В. Стефанюк  
АН України

Мета і завдання досліджень. Мета роботи полягає в аналітичному та експериментальному дослідженні впливу основних технологічних факторів на процес гідролізу протопектину у двофазній системі з малим значенням гідромодуля і на основі одержаних результатів розробки інтенсивного способу вилучення пектинових речовин з використанням НВЧ-енергії.

Відповідно до цього визначено такі завдання:

- вивчити фізико-хімічні характеристики пектинових речовин і клітин рослинної тканини при термічній обробці;
- дослідити вплив основних технологічних факторів процесу гідролізу протопектину на повноту перетворення його в розчинену форму і визначити межі їх чисельних значень;
- розробити математичну модель процесу гідролізу протопектину в умовах малих значень гідромодуля;
- дослідити витрати тепла для процесу гідролізу пектинових речовин рослинної сировини при зміні гідромодуля системи;
- дослідити реакцію середовища рідинної фази яблучного жому при різних значеннях гідромодуля;
- визначити і дослідити діелектричні властивості яблучного жому;
- дослідити якість і властивості пектину, вилученого з пектиновмісної сировини з використанням НВЧ-енергії;
- розробити спосіб і апаратно-процесну схему виробництва пектинового екстракту з використанням НВЧ-енергії.

#### Наукова новизна роботи.

Завдяки проведеним теоретичним і експериментальним дослідженням: встановлені діелектричні характеристики яблучного жому залежно від частоти НВЧ-випромінювання, вологості і температури сировини;

визначені параметри нагріву яблучного жому в процесі гідролізу протопектину з використанням НВЧ-енергії;

досліджені технологічні параметри гідролізу протопектину яблучного жому з використанням НВЧ-енергії в умовах малих значень гідромодуля і встановлений оптимальний режим процесу.

Запропоновано математичну модель процесу гідролізу протопектину з використанням НВЧ-енергії в умовах малих значень гідромодуля.

Установлено можливість проведення безкислотного процесу гідролізу протопектину рослинної тканини, в якій власна реакція середовища  $pH < 3,2$ , з використанням НВЧ-нагріву сировини.

Практична цінність роботи полягає в розробці технології процесу гідролізу пектинових речовин з використанням НВЧ-енергії в середовищах з гідромодулем, рівним вологості яблучного жому. Вперше розроблено спосіб інтенсифікації вилучення пектинових речовин з яблучного жому з використанням НВЧ-енергії (на спосіб отримано авторське свідоцтво).

Апробований спосіб інтенсифікації вилучення пектинових речовин з використанням НВЧ-енергії дозволяє організувати безвідходну переробку яблучної сировини і отримати екологічно чисті яблучні пектинові екстракти. Обгрунтовано економічну доцільність його використання у промисловості.

Методологія досліджень включає сучасні методи термодинаміки, теплофізики і електродинаміки НВЧ радіохвиль, методики досліджень і аналізу продуктів гідролізу речовин тощо.

Вірогідність одержаних результатів, висновків і рекомендацій забезпечена застосуванням сучасних методів теоретичних і експериментальних досліджень та вимірювальних приладів, апробованих методів математичного моделювання, планування експериментів і математичної статистики для обробки результатів, достатнім об'ємом результатів лабораторних і промислових досліджень.

Особистий внесок автора полягає в загальній постановці завдань для досліджень, проведенні експериментів, обробці і аналізі результатів, формулюванні встановлених закономірностей, безпосередній підготовці і участі у промислових випробуваннях. Висновки і рекомендації роботи автор одержав особисто.

Реалізація результатів досліджень. Висновки і рекомендації роботи стали основою для виготовлення технічних засобів НВЧ-теплової обробки яблучного жому як сировини для отримання пектину з метою проведення процесу гідролізу протопектину без використання хімічних реагентів.

НВЧ-установка, обладнання і спосіб інтенсифікації вилучення пектинових речовин без використання хімічних реагентів були випробувані і рекомендовані для використання в промислових умовах на АСП "Колос" Смілянського району Черкаської області.

Результати досліджень мають економічний і соціальний ефект і сприяють виконанню завдань Національної програми "Діти України".

Апробація результатів роботи. Основні положення дисертаційної роботи було викладено і обговорено на Міжнародній науково-технічній конференції "Розробка та впровадження нових технологій і обладнання у харчову та переробну галузі АПК" (м.Київ, 1993 р.), Всеукраїнській науково-технічній конференції "Розробка та впровадження прогресивних технологій та обладнання у харчову та переробну промисловість" (м.Київ, 1995 р.), науково-практичному семінарі "Електротехнологія у харчовій промисловості" (м.Київ, 1995 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 6 наукових робіт, у тому числі одне авторське свідоцтво на винахід.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, шести глав, висновків і рекомендацій, списку бібліографічних найменувань та додатків. Роботу викладено на 141 сторінках основного тексту, вона містить 25 малюнків, 12 таблиць, бібліографія має 125 найменувань вітчизняних і зарубіжних джерел.

#### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першій главі виконані огляд і аналіз сучасного стану техніки і технології вилучення пектинових речовин з рослинної сировини і проведено аналіз можливих шляхів інтенсифікації виробництва, зокрема з метою забезпечення пектинопрофілактики населення України.

Огляд наукової інформації вказує, що у світовій практиці найбільше розповсюдження отримав кислотно-термічний метод виробництва пектину. Найбільша увага надається удосконаленню його окремих операцій на етапах підготовки сировини, гідролізу протопектину, екстрагування пектину, очистки та концентрації отриманого екстракту за рахунок оптимізації технологічних параметрів цих процесів при зменшенні витрат і зниженні вартості робочих агентів - кислот, спиртів, солей.

Крім того, для активації вищезазначених процесів відомі способи, які включають додаткові механічні, електричні або хімічні методи впливу. Так, у деяких роботах визначено позитивний вплив електромагнітних полів, накладених при гідролізі та екстрагуванні, який полягає у скороченні тривалості процесу до 30...90 хвилин та збільшенні обсягу отримуваних цільових компонентів із забезпеченням їх стерилізації.

У зв'язку з низьким вмістом у сировині цільового компоненту отримання пектину за кислотно-термічною технологією відноситься до виробництв, які дорого коштують. Для завдань профілактики має слушність використання пектину, отриманого за допомогою харчових кислот, частина витрат на які дорівнює понад 70% у собівартості продукції.

Використання мінеральних кислот замість органічних дешевше, але потребує додаткових численних операцій промивки та нейтралізації.

Складна технологія і специфічні вимоги до обладнання стимулюють розробку альтернативних методів так званого безкислотного термогідролізу. У цьому випадку головними факторами, які потребують досліджень, є природна кислотність сировини (рН середовища), температура, гідромодуль і тривалість процесу.

Відомий позитивний досвід використання безкислотного термогідролізу, де за робочого агента мають кілька ферментів, або беруть воду після її електромембранної обробки ЕАВС. Також відомі спроби використання електроімпульсів і постійного електричного струму для організації і управління тепловими процесами при гідролізі і екстрагуванні в технології виробництва пектину. Можливості НВЧ-енергетики у цьому напрямі не досліджені.

З літературних джерел відомо про успіхи у термообробці сировини і продуктів для харчової промисловості, які досягнуті завдяки використанню НВЧ-методів нагрівання, тобто випромінюванню надвисокочастотного діапазону електромагнітних хвиль. Цьому напрямку присвячено роботи І.А.Рогова, А.С.Некрутмана, В.Я.Адаменко, Г.В.Лисова, Г.Пюшнера, Э.Скреса, Ю.С.Архангельського, І.І.Дев'яткіна та інших. Серед переваг НВЧ-обробки матеріалів мають місце відсутність безпосереднього контакту з джерелом нагріву, об'ємний проникаючий характер дії, широкі можливості управління швидкістю проходження теплових і хімічних процесів, екологічна чистота технології.

Розвинута практика використання НВЧ-техніки у харчовій промисловості, а також аналіз відомих способів інтенсифікації вилучення пектину спонукають дослідити можливості НВЧ-нагріву для здійснення процесів його отримання, зокрема для реалізації процесу безкислотного гідролізу. З вищезазначеним визначені завдання досліджень.

У другій главі визначені об'єкти і методи досліджень, викладені методи вимірювань діелектричних характеристик сировини, проведено їхній аналіз.

За об'єкти досліджень мали яблучний жом, пектиновий екстракт та яблучний пектин. Були визначені методики випробування цих продуктів на вміст сухих речовин (СР), вологість (W,%), реакцію середовища (рН), вміст пектинових речовин (ПР), желюючу здатність отриманих екстрактів (ЖЗ) (за Сосновським). У відібраних для досліджень сортах яблук вміст ПР дорівнював 1,35...1,46% маси свіжої сировини, у тому числі протопектину 1,19...1,28%, титрована кислотність обмежувалась 0,13...1,72% до маси сирої речовини.

Третя глава присвячена аналізу головних факторів процесу гідролізу протопектину яблучного жому, таких як гідромодуль, значення рН середовища і температури та їх впливу на кількість і якість отримуваних продуктів.

Враховуючи те, що рідинна фаза гідролізованої маси являє собою 0,5...1,5% розчин мінеральної кислоти, то на кожну одиницю гідромодуля у промисловому реакторі, який вміщує, наприклад, 500 кг сировини, у перерахунку на суху масу припадає від 2,5 до 7,5 кг кислоти. У зв'язку з цим зниження гідромодуля поряд із зменшенням водопотреби сприяє зменшенню кількості хімічних реагентів і, як наслідок цього, збитків, пов'язаних з подальшою очисткою продуктів пектинового виробництва. При переробці свіжої сировини (W 80%) існуюче обладнання не дозволяє здійснити процес гідролізу, якщо гідромодуль менше 4 (нагрів до 348...358 К). Це пов'язано з нерівномірністю розподілу рідинної фази кислоти у реакційній зоні, внаслідок чого виникає розклад пектинових речовин до галактуранової кислоти. Таким чином, необхідність високого гідромодуля не є істотною потребою технології. Його можливо знизити (шляхом сушіння або віджимання до СР-30...35%), якщо забезпечити умови ефективного тепло- і масообміну у середовищі, що доладно обґрунтовується в експериментальній частині роботи.

Вивчення впливу рН середовища клітинного соку на ступінь гідролізу ілюструють дані таблиці 1, які підтверджують можливість проведення процесу при малих гідромодулях і за рахунок природної кислотності сировини. Якісні показники суттєво залежать від рН соку (рН-2,75...4,68). Враховуючи, що природна реакція середовища має обмежене значення, виникає потреба зв'язувати ступінь впливу третього головного фактора - температури на показники процесу гідролізу протопектину.

На підприємствах, звичайно, нагрів виконують шляхом передачі тепла через стінку парової сорочки реактора до сировини з одночасним

її перемішуванням. Тобто здійснюються процеси термодифузії і концентраційної дифузії, які суттєво одне від одного не залежні. У дисертаційній роботі доведено, що для полегшення процесу одержання пектинового екстракту необхідно, щоб температура гідроагента (води) була б менша на 291...293К, ніж температура нагрітого яблучного жому. У цьому випадку явище термодифузії посилить течію концентраційної дифузії і швидкість екстрагування пектинових речовин аромате.

При цих дослідженнях теоретично і експериментально отриманий розподіл (за часом) температурного поля у яблучному жомі при традиційному нагріві і розглянуті процеси переміщення капілярної вологи під дією температурного градієнта. Не підлягає сумніву вибірковість нагріву компонентів об'єкта у НВЧ-полі (зокрема на це вказують виміри діелектричних характеристик сировини у порівнянні з водою), тому можливість досягнення вказаного градієнта температур сировини і агента надалі підлягає перевірці.

Для того, щоб прогнозувати ефективність обробки яблучного жому електромагнітною енергією НВЧ, необхідне визначення діелектричних характеристик об'єкта (діелектричне проникнення  $\epsilon'$  тангенс кута діелектричних збитків  $\text{tg} \delta$ ). Їх добуток визначає так званий фактор збитків у формулі: в якій видно, що максимальному введенню енергії сприяє зростання або частоти, або напруженості електромагнітного поля випромінювання.

$$P_n = 0,278 \cdot 10^{-12} f (\epsilon' \text{tg} \delta \epsilon) |E|^2 \quad (1)$$

Але підвищення  $|E|$  обмежують явища пробою, локального перегріву і, як наслідок цього, деградації і деполімеризації молекул рослинної тканини, що знижує якість кінцевого продукту. У зв'язку з цим для процесу діелектричного нагріву здається доцільним підвищення частоти, тобто перехід у надвисокочастотний діапазон електромагнітних хвиль.

У дисертації розглянуто вплив частоти випромінювання на зміну діелектричних характеристик яблучного жому ( $\epsilon'$  і  $\text{tg} \delta$ ). Дослідження проведені в використанні трьох різних методик відповідно до діапазонів (0,15...0,25 ГГц), (0,3...0,65 ГГц), (0,6...3,0 ГГц). Використовуваний автоматизований стенд обладнаний куметром Е4-5А, вимірювальними мережами Р1-11, Р1-17, генераторами типу ГЗ-22, Г4-129 тощо.

Результати вимірювань (рис. 1, 2) показали, що в діапазоні частот 0,1 - 3,5 ГГц величина діелектричної проникності знаходиться в

межах 10...70 од. відносно до вологості аразка і має досить слабку залежність від частоти випромінювання. Тангенс кута діелектричних збитків змінюється від 0,05 до 0,7 і зростає у верхній частині використовуваного діапазону частот.

Експериментально отримані температурні залежності  $\epsilon'$  і  $\tan \delta$  (рис. 3, 4) свідчать, що починаючи з температури 310...320K, величини діелектричних характеристик зростають, причому зростання більш інтенсивне в низькочастотній області. З одного боку, це вказує на підвищення фактора збитків енергії в сировині, з другого - на зменшення глибини проникності. Останнє потребує при розробці технології передбачити процеси переміщування матеріалу або змішувальних пристроїв для НВЧ-енергії.

Результати визначення діелектричних характеристик дозволяють розробити процес НВЧ-обробки яблучного жому і надалі використані в дослідженнях.

На завершення глави 3, згідно з планом повного факторного експерименту, розроблено математичну модель і отримано регресійне рівняння виходу пектинових речовин при екстрагуванні, що дозволяє в'ясувати взаємодію вищераглянутих факторів:

$$\gamma_{\text{пр}} = -61,93 + 2,97(\rho\text{H}) + 0,48(T) + 1,53(\tau) - 0,38(\rho\text{H})^2, \quad (2)$$

У четвертій главі наведено результати аналітичних досліджень процесів взаємодії електромагнітних полів з обмеженими обсягами сировини з метою встановити структуру електромагнітного поля і умови, які забезпечують концентрацію енергії в об'єкті. Проведені розрахунки глибин проникнення та балансу енергії.

У численних публікаціях визначаються наступні режими обробки НВЧ-випромінювання з сировиною: відкритого, напіввідкритого і закритого діелектричного резонатора (ЗДР). В останньому випадку забезпечуються найбільш упорядковані структури поля, але їх вивчення отримується тим фактором, що діелектричний резонатор частково заповнений сировиною. Нами послідовно вирішувалися два завдання: перше - в'ясувати структуру поля між випромінювачем і об'єктом, обробки і друге - визначення структури поля в обмеженому середовищі яблучного жому.

За випромінювач використовувався відрізок прямокутного хвилеводу з хвилею нижчого типу коливань TE<sub>10</sub>. Маючи відоме значення поля на розкритті хвилеводу, знаходимо поле у довільній точці поверхні в

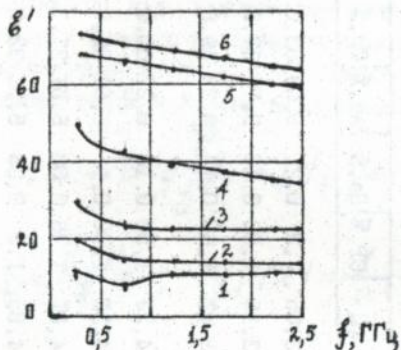


Рис. 1

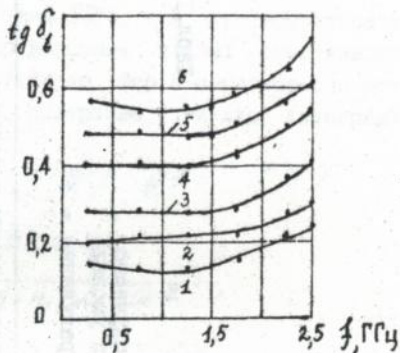


Рис. 2

Залежності діелектричних характеристик яблучного жому від частоти при вологості сировини: 1-3,34%, 2-10%, 3-30%, 4-50%, 5-70%, 6-90% відповідно.

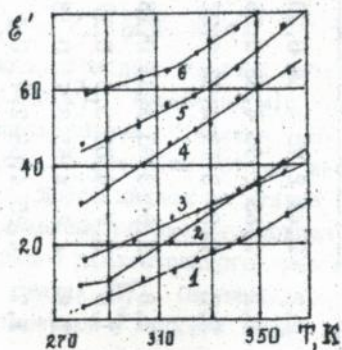


Рис. 3

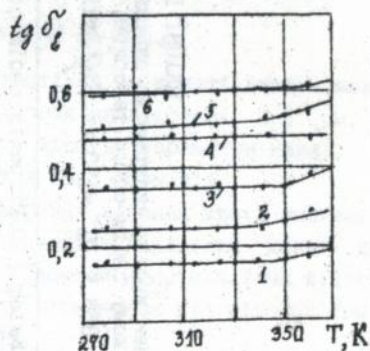


Рис. 4

Залежності діелектричних характеристик яблучного жому від температури (вологість аражків сировини 1...6 та ж сама, як для залежностей рис. 1, 2).

Табл. I

## ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ

пектинових екстрактів, одержаних при гідролізі яблучного  
жому своїм соком та соком, розчиненим водою при умовах:

T = 353 K,  $\tau$  = 70 хв.,  $\eta$  гідролізу = 3,  $\eta$  екстрагування = 3

Сорт яблук	Вміст ПР у жомі, % маси	Гідроліз своїм соком							Гідроліз соком з водою						
		рН кислин- ного соку	екстракт						рН соку	рН роз- чину	екстракт				
			рН	СР,%	Пе,%	Ае,%	Сг,%	рН			СР,%	Пе,%	Ае,%	Сг,%	
Київські зимові	2,2	2,42	2,75	4,54	0,29	6,38	93	2,42	2,72	3,05	2,2	0,2	9,09	63,6	
Антонівка звичайна	2,2	2,65	2,98	4,33	0,25	5,77	80	2,65	2,95	3,15	1,85	0,18	9,73	57,2	
Мінські	2,0	2,8	3,13	4,02	0,22	5,47	78	2,8	3,1	3,42	1,68	0,14	8,33	49,0	
Білоруські малинові	1,8	3,6	3,93	3,8	0,18	4,73	70	3,6	3,95	4,22	1,58	0,13	8,22	50,5	
Телісааре	1,9	3,7	4,03	3,6	0,17	4,72	65	3,7	4,1	4,30	1,50	0,1	6,66	36,8	
Норіс	1,8	4,2	4,53	3,1	0,13	4,33	50	4,2	4,62	4,81	1,45	0,08	5,51	31,1	
Ренет курський	1,7	4,35	4,68	2,7	0,1	3,7	45	4,35	4,68	4,85	1,5	0,08	5,33	32,9	

залежності від відстані до випромінювача ( $x$ ), яке перетворюється у вихідну функцію на площі розкриття (що доповнює відомі розв'язання аналогічних задач). За допомогою подвійного Фур'є-перетворення отримано вираз поля між випромінювачем і поверхнею у вигляді інтегралу:

$$P(x, x) = B \int_0^{x/2} f_1(\alpha) f_2(\alpha) f_3(\alpha) d\alpha, \text{ де } (3)$$

$$B = \frac{K_a E_0}{2}; \quad f_1(\alpha) = \frac{1 + e^{i a k x \sin \alpha}}{a^2 k^2 \sin^2 \alpha - \pi^2};$$

$$f_2 = e^{i k (x \sin \alpha + x \cos \alpha)}; \quad f_3 = \cos \alpha.$$

Отримано чисельний розв'язок рівняння (3) для наступних умов:

$$0 < \alpha < 90^\circ, \quad 0 < x < 10 \text{ см}, \quad a = 9 \text{ см},$$

$$\lambda = 12,63 \text{ см}, \quad E_0 = 164 \text{ В/см}$$

(що відповідає густині потоку потужності на розкритті випромінювача 74 Вт/см<sup>2</sup>). Визначено мінімум енергії поля на відстані 3-6 см від випромінювача. Рівняння (3) дозволяє одержати параметри хвилі, яка падає на поверхню об'єму, незалежно від його розмірів.

Друга задача заснована на відшукуванні власних типів коливань в обмеженому об'ємі середовища як суми однорідних плоских хвиль двомірного діелектричного резонатора з відомими коефіцієнтами відбиття на гранях ( $\tilde{\alpha}_j$ ). Отриманий розв'язок відрізняється від відомих тим, що змінюється у широких межах від 0 до 1:

$$\text{tg } \alpha = \frac{A[\rho + \rho_3(\alpha) + \rho_4(\alpha)]}{B[\rho + \rho_1(\alpha) + \rho_2(\alpha)]}, \text{ де } (4)$$

$$\rho_j = \frac{A \tilde{\alpha}_j \tilde{R}_r}{2\pi}, \quad \tilde{\alpha}_j = \alpha_j^2 + \beta_j^2,$$

$$\vec{R}_n = d + i\beta - \frac{(\epsilon_1 - 1) + \epsilon_2 D}{T_1} + i \frac{\epsilon_2 C - (\epsilon_1 - 1) D}{T_1}$$

Сукупне розв'язання рівнянь (3), (4) дає змогу визначити амплітуду поля  $E_{pp}$  для будь-яких типів коливань та обрати для використання тип коливань з найбільшою амплітудою. У дисертаційній роботі наведені розрахунки та графічне зображення структури електромагнітного поля діелектричного резонатора з яблучним жомом різної вологості для різних типів коливань. Визначені найбільш ефективні для нагріву структури поля, з використанням хвиль перпендикулярної поляризації для збільшення кількості впровадженої енергії.

Безпосередніми вимірами (зондуванням поля у жомі), а також розрахунками на основі отриманих величин  $\epsilon' i \tan \delta$  доведено, що використання НВЧ-випромінювання з довжиною хвиль 10...100 см забезпечує глибину проникнення в середовище у межах до 40 см.

Розрахунки балансу енергії при НВЧ-нагріванні однакового об'єму жому - 0,0023 м<sup>3</sup> від 293К до 358К показали, що для тривалості процесу 1,5 і 10 хв. відповідно необхідна НВЧ-потужність 3,32; 0,66 і 0,332 кВт. НВЧ-генератори з такими характеристиками (довжина хвиль і потужність) у безперервному режимі генерації добре освоєні у виробництві.

У п'ятій главі досліджені технологічні режими НВЧ-нагрівання при гідролізі протопектину яблучного жому з малим гідромодулем.

1. Визначені показники процесу введення НВЧ-енергії в об'єкт переробки для режимів бігучої та стоячої електромагнітної хвилі. Для цього обґрунтовано використання НВЧ-установки типу "Хурма" (частота  $2375 \pm 50$  МГц, потужність регульована 0...5 кВт), виготовлено експериментальний стенд для здійснення НВЧ-обробки яблучного жому, який включає відрізки прямокутних хвилеводів з двома відгалуженнями на вимірвачі МЗ-1А для падаючої і відбитої хвилі, а також комплект опромінювачів. Камера обробки мала габарити 2x2x2 (м) з внутрішнім покриттям радіопоглинаючим матеріалом ХВ-10,6. Розроблена методика випробувань на низькому рівні НВЧ-потужності, так звані "холодні" виміри параметрів введення енергії (на відміну від "гарячих", які потребують високої потужності для встановлення параметрів НВЧ-нагрівання).

Встановлено, що оптимальні умови введення НВЧ-енергії у сировину яблучного жому з вологістю 10...80% забезпечені при мінімальних значеннях коефіцієнта стоячої хвилі по напрузі (КСХН). Щоб задовільнити

цю вимогу, відстань між опромінювачем і зразком жому повинна дорівнювати  $\lambda_0/4 \dots 3/8 \lambda_0$ . Також для досягнення цілей якісного угодження та уведення енергії обґрунтовано використання за випромінювач відкритого кінця регулярного прямокутного хвилеводу (у порівнянні з випромінюванням з круглого хвилеводу та з рупорів). Поряд з можливістю досягти високих рівнів густини потоку випромінювання, для прямокутного хвилеводу легше забезпечити поле з перпендикулярною поляризацією, вимога якого встановлена вище.

2. Отримані температурні залежності процесу НВЧ-нагрівання яблучного жому.

Досліджені два варіанти нагрівання: у полі біжучої хвилі і у резонаторі (поле стоячих хвиль). Описано приладдя та методика випробувань (з урахуванням статистичних методів).

Відповідно до цілей досліджень переважна увага надавалася з забезпеченню рівномірності теплової обробки об'єкта. Визначено, що режимі біжучої хвилі це досягається або забезпеченням необхідного типу коливань, або переміщенням матеріалу.

Ширші можливості є для резонаторних методів нагрівання для яких випробувані: а) збуджування кількох типів коливань; б) елементи типу обертальних дісекторів; в) кілька збуджувачів (петель зв'язку) у різних частинах камери; г) переміщення (обертання) предметного стола. Проведені виміри розподілу температури вадозж зразків яблучного жому (за рівних інших умов) дозволили вибрати режим обертального руху зразків у резонаторній камері, що найбільше сприяє рівномірній обробці. Для цих умов встановлені залежності температури від часу опромінювання для різних рівнів НВЧ-потужності при аміні фізичних та діелектричних характеристик зразків жому, наприклад наведені на рисунку 5.

3. Досліджені тривалість обробки та необхідна НВЧ-потужність для забезпечення умов гідролізу протопектину з малим гідромодулем.

Визначені вище залежності  $T(\mathcal{E})$  дають підставу дослідити необхідну НВЧ-потужність для забезпечення технологічного темпу нагрівання. Як свідчать дані рис. 6, з підвищенням потужності (P) кількість випаровуваної вологи зростає експоненціально, тобто є можливість за рахунок аміні P отримати після НВЧ-обробки гідромодуль процесу гідролізу в межах  $0,2 < q < 4$ . Пунктирна лінія рис. 6 відповідна часо-

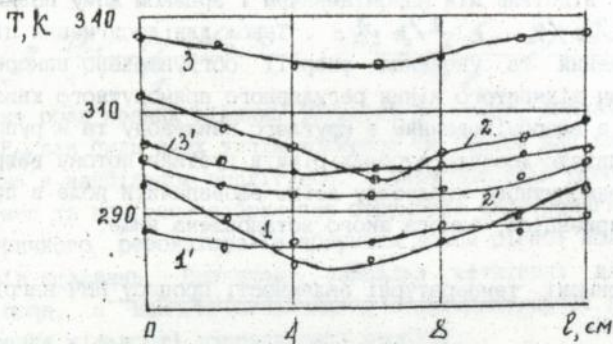


Рис. 5. Розподіл поля температур вздовж зразків яблучного жому при обертальному русі і частоті випромінювання 2375 МГц 1,2,3 -  $W = 30\%$ ; 1', 2', 3' -  $W = 14\%$

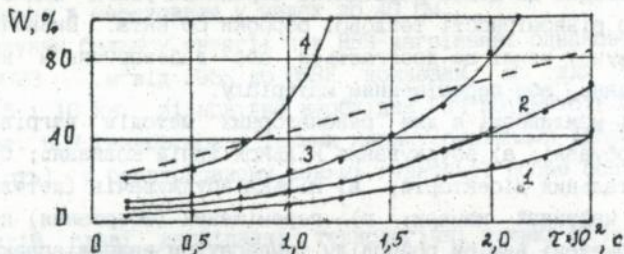


Рис. 6. Зміна вологості яблучного жому за часом опромінювання при рівних рівнях НВЧ-потужності P: 1 - 0,5 кВт; 2 - 1,5 кВт; 3 - 3 кВт, 4 - 5 кВт.

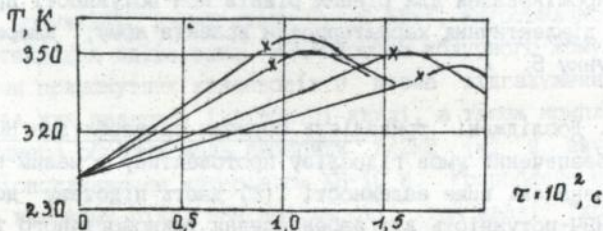


Рис. 7. Характер зміни температури за час НВЧ-нагрівання яблучного жому та післядії (x - момент вимикання генератора); 1,1 - НВЧ-потужність 3 кВт; 2,2 - 5 кВт; 1,2 - у центрі зразків; 1,2 - на середині радіуса циліндричних зразків ( $\Phi = 10$  см)

ві, коли яблучний жом досягає стабільної температури гідролізу 350...355K. Таким чином, для швидкого нагрівання жому (1...3 хв.) потрібна потужність 3...5 кВт (порівняємо залежності 1, 2 а 3, 4 рис. 6).

Після установаження оптимальної температури 350...355K її потрібно підтримувати протягом 15...20 хвилин для адійснення гідролізу при малому гідромодулі (гл. 3 дисертації). Для цього необхідно або вимкнути НВЧ-генератор, або перекинути на дуже малу потужність, що більш технологічно, бо це збереже ресурс роботи магнетрона.

Досліди часу температурної післядії (рис. 7) завбачають можливість реалізації циклічного опромінювання. З'ясовано, що після вимикання температура зменшується експоненціально. Так, наприклад, для залежності 2 рис. 7 при опромінюванні до температури 350K і вимиканні генератора за 10 с. температура досягає 356K і за той же час (10 с.) знову спадає до 350K, після цього потрібний наступний цикл нагрівання. Таким чином, обгрунтована доцільність циклічної НВЧ-обробки, що поряд з усім сприяє енергозбереженню.

У дисертаційній роботі наведені результати НВЧ-нагрівання гражків жому різної маси (0,2...5,0 кг) і вологості (80...10%). Отримані дані дозволяють рекомендувати режим циклічної НВЧ-обробки з обертовим рухом об'єкта у резонаторі, при цьому при вологості сировини 10...80%, для  $T = 350...355K$  потрібний час  $t_{\text{н}} = 1...3$  хв., потужність  $P = 3...5$  кВт. Визначені технологічні параметри потребують коректування для конкретних технічних рішень, зокрема конструкції камери обробки (форма і розмір), а також транспортування сировини (точне чи радове); первинна вологість та температура.

Шоста глава вміщує результати розробки способу та НВЧ-устаткування для вилучення пектину та їх випробування в умовах АСП "Колос" Смілянського району Черкаської області.

Розроблені дві апаратурно-технологічні схеми гідролізу протопектину: з безперервним режимом (транспортування сировини завдяки циліндричному конвейєрові) та циклічним режимом НВЧ-нагрівання сировини. В останньому випадку робочими реакторами для гідролізу і екстрагування були 3-літрові скляні ємкості (що не дошкучає процесові, бо скло досить прогоре для НВЧ-випромінювання:  $\epsilon \approx 5...8$ ;  $\tan \delta \approx 0,001...0,01$ ). Докладно висвічені розв'язки технічних вузлів цих двох конструкцій та їх компонування, а також моменти виготовлення, монтажу і налагоджування.

Випробувальний період для розробленої технології та устаткування тривав понад 8 місяців, що дозволило зробити досить обґрунтовані висновки щодо використання. Для подальшого розповсюдження рекомендована схема циклічної НВЧ-обробки, яка найбільш приваблива з точки зору експлуатаційної надійності.

Згідно з розробленим способом обезводжена сировина завантажується у 3-літрові ємкості при співвідношенні мас 2,0...2,5, при цьому у середовищі зберігається рН природної яблучної сировини 2,5...3,0. Завдяки циклічному вмиканню НВЧ-генератора (3-5 разів) температура сировини встановлюється 343...358К. Тривалість гідролізу сягає 0,6...1 год., використовувана густина потоку НВЧ-потужності - 70...150 Вт/см<sup>2</sup>, одне вмикання триває 3...5 с.

При цьому слід відзначити, що максимальна ступінь гідролізу яблучного жому спостерігається при нагріванні до 361...363К, але якість отриманих екстрактів у 60% випадків недостатня. Тому доцільно здійснювати гідроліз при температурі 343...358К і рН середовища 2,5...3,0 (останнє задовільняє вимоги по кислотності екстракту для харчових підприємств). Ступінь гідролізу при цьому досягає 90%.

Далі встановлено, що чим нижча температура екстрагування (яка знаходиться в межах 345...363К), тим вища желюча здатність екстракту, але це супроводжується зменшенням кількості отримуваних пектинових речовин. Щоб запобігти цьому, а також зменшити густину екстракту для наступного фільтрування, у сировину добавляли воду Т - 313...323К (тобто гідромодуль доводиться до  $g - 5...8$ ), при цьому вміст пектинових речовин у екстракті сягає 0,3...0,5%. Після фільтрації оцінювали якість екстракту відносно кількості сухого порошку, виділеного з рідинної фази методом спиртового осаджування. Досліди показали, що середня кількість сухих речовин в екстракті не менша 2,5%, у тому числі спиртоосаджуваних речовин не менш, як 0,5%, рН середовища екстракту складає 3,2...3,4.

Доброякісність отриманого пектинового екстракту ( $D_5 = (PR/CP) \cdot 100, \%$ ) оцінюється у межах 20...30%. Вміст моно- і дисахаридів сягає до 0,9. Фізико-хімічний склад пектинового екстракту відповідає вимогам до пектинопродуктів профілактичного призначення.

За результатами досліджень, у тому числі промислових випробувань, оцінено економічний ефект від вживання НВЧ-технології вилучення пектину і пектинопродуктів. У порівнянні з традиційним способом виробництва (із вживанням лимонної кислоти) економічна ефективність розробки на 1996 рік дорівнює приблизно 250 млн.крб. (на початок 1996 року) на одну НВЧ-установку номінальної потужності 5 кВт з обсягом виробництва 250 кг пектину за рік.

## ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

У дисертаційній роботі дано нове рішення актуального наукового завдання із визначення характеристик і залежностей в процесі обробки яблучного жому НВЧ-енергією при гідролізі і екстрагуванні сировини власним соком із малим гідромодулем без використання додаткових кислотних реагентів, що дозволило розробити спосіб інтенсифікації процесів гідролізу та екстрагування, технологію і устаткування з використанням НВЧ-енергії для його здійснення з метою виробництва пектинопродуктів в умовах малих підприємств, які забезпечуть потреби пектинопрофілактики населення.

Основні результати досліджень, проведених відповідно до висунутих завдань, полягають у наступному:

1. Для процесу гідролізу протопектину яблучного жому власним соком (його розчином у воді) при малих гідромодулях системи досліджені вплив рН середовища, гідромодуля, температури і тривалості процесу на повноту і якість перетворення протопектину у розчинну форму та встановлені границі їх чисельних значень:  $2,75 < \text{pH} < 4,68$ ;  $0,2 < q < 4$ ;  $343 < T < 363$ , К;  $0,5 < \tau < 1$ , год. Розроблено напівемпіричну модель процесу гідролізу протопектину і отримано регресійне рівняння виходу пектинових речовин у залежності від вказаних параметрів.

2. На підставі вимірювання діелектричних характеристик зразків яблучного жому із вологістю від 3,5 до 90% зроблено висновок про можливість його ефективного нагрівання у вищевказанім температурнім діапазоні з використанням електромагнітної енергії НВЧ. Установлено, що для частоти випромінювання 0,5...2,5 ГГц у залежності від вологості сировини діелектрична проникливість змінюється від 10 до 70 од., тангенс кута діелектричних втрат - від 0,05 до 0,7 од. Відповідно до цього фактор втрат (оцінюють переведену у тепло ЗВЧ-потужність) сягає до 50 од., а глибина проникнення становить до 40 см для повітряно-сухих зразків жому.

3. Виконано теоретичні дослідження теплових процесів у яблучному жомі при традиційному нагріванні. Установлено, що для підвищення виходу пектинових речовин температура гідроагента повинна бути на 291...293К нижча, ніж температура нагрітого яблучного жому. При цьому концентраційна дифузія посилюється термодифузією, це сприяє швидкості гідролізу та екстрагування.

4. Рішенням відповідних задач досліджено процеси розповсюдження електромагнітної енергії в системі випромінювач - поверхня жому -

яблучний жом. Визначено ефективні структури електромагнітного поля для НВЧ-нагрівання жому в резонаторному режимі, яким відповідні мінімальні значення індексів типів коливань. Вказано можливість збільшення кількості введеної в сировину енергії за рахунок використання хвиль з перпендикулярною поляризацією.

5. Експериментально досліджено процеси уведення НВЧ-енергії в сировину. Установлено, що використання методів угодження випромінювачів з навантаженням (сировиною), зокрема шляхом зміни відстані у просвіті, дає змогу досягти КСХН не більш 1,2%, що відповідає коефіцієнтові уведення енергії - до 95% від підведеної потужності.

6. Досліджено процеси НВЧ-нагрівання яблучного жому. Установлено залежності для визначення швидкості нагрівання сировини з різною вологістю при зміні потужності. Для зразків сировини з масою 0,5...5,0 кг при їх нагріванні до 350К визначено тривалість нагрівання від величини потужності. Досліджено розвиток температурних полів у сировині у статичі та при обертальному русі зразків. Рекомендований обертальний рух із швидкістю 1...3 об./хв для забезпечення рівномірного нагрівання. Досліджено ефект температурної післядії, що дозволило рекомендувати циклічність НВЧ-опромінювання сировини для підтримки температури протягом гідролізу та екстрагування.

7. За результатами проведених досліджень:

- розроблено "Спосіб сушки пектиновмісткої сировини" (Заявка N 94051455 від 25.05.93 N В3503538/4/1452/МКВ 5 А23В7/02) (Куянов Ю.Ю., Гулий І.С., Карлович М.С. та інші);

- запропоновано технологічну схему вилучення пектинового екстракту і пектину при малих гідромодулях системи з використанням НВЧ-нагрівання яблучного жому при гідролізі та екстрагуванні;

- розроблено, виготовлено та випробувано дві принципово різні конструкції (періодичної та безперервної дії) для здійснення технології гідролізу і екстрагування з використанням НВЧ-електромагнітного поля.

8. Промислові випробування розробленої технології та устаткування підтвердили можливість одержання пектину і пектинопродуктів, які задовольняють вимогам пектинопрофілактики населення, і дозволили рекомендувати для використання в умовах малих підприємств НВЧ-установки періодичної дії. У порівнянні з традиційною технологією виробництва пектину, використання результатів розробок дозволить при по-

тужності НВЧ-генератора 5кВт і обсязі виробництва 250 кг пектину за рік отримати економічний ефект близько 250 млн.крб. (за цінами на 1996 рік) на одну установку.

#### ПОЗНАЧЕННЯ

Крім тих, що пояснені в тексті, використані такі позначення:

$P_n$  - питома потужність збитків НВЧ-енергії, яка поглинається матеріалом, Вт/см ;

$f$  - частота випромінювання, Гц;

$|E|$  - модуль вектора напруженості електромагнітного поля, В/см;

$Y_{пе}$  - вихід пектинових речовин, %;

$pH$  - кислотність середовища, од.

$T$  - температура, К;

$\tau$  - тривалість обробки, хв;

$Pe$  - кількість розчиненого пектину, %;

$Pr$  - кількість протопектину в сировині, %;

$Ae$  - відношення кількості пектину до сухих речовин в рідинній фазі, %;

$Cr$  - ступінь гідролізу, %;

$KCXH$  - коефіцієнт стоячої хвилі по напрузі електромагнітного поля;

$E_0$  - амплітуда електричних компонентів електромагнітної хвилі на розкритті випромінювача;

$a$  - розмір широкої стінки випромінювача вдовж координати  $X$ ;

$K$  - хвильовий вектор, рівний  $2\pi/\lambda$  ;

$\lambda$  - довжина хвилі генератора НВЧ;

$\alpha$  - кут між вектором  $K$  (або  $E$ ) та віссю  $Z$  ;

$A, B$  - розміри резонатора;

$p, q$  - суцільночисельні індекси типів коливань, од.;

$\lambda_0$  - довжина хвилі генерації;

$P$  - густина потоку потужності, Вт/см<sup>2</sup>;

$g$  - гідромодуль процесів гідролізу та екстрагування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Куянов Ю.Ю. Установа для НВЧ-оброблення пектинової сировини /Тев.доп.міжн.н.-т.конф. "Розробка та впровадження нових технологій і обладнання у харчову та переробні галузі АПК". - Київ, 1993.-С.97.

2. Фізико-хімічні аспекти вилучення пектинових речовин. / Донченко Л.В., Гулий І.С., Карпович М.С., Крапивницька І.О., Куянов Ю.Ю., Гурська О.Ф.// Наукові праці Українського державного університету харчових технологій. - Київ, 1993. - N 1. - С.125.

3. Теоретическое обоснование использования СВЧ-энергии для сушки пектиносодержащего сырья. / Куянов Ю.Ю. // Деп. в УкрНТЭИ. - 25.01.95 г., N 203 - 9к 95.

4. Спосіб сушки пектиновмісткої сировини. / Куянов Ю.Ю., Гулий І.С., Карпович М.С. та ін./ / Заявка N 94051455, МКВ А23В7/02, від 25.05.93 N В3503538/4/1452.

5. Спосіб виробництва пектинопродуктів в умовах малих підприємств / Куянов Ю.Ю., Сороколіт М.І., Карпович М.С. та інші/ Тев.доп.всееукр. н.-т. конф. "Розробка та впровадження прогресивних технологій та обладнання у харчову та переробну промисловість". - Київ, 1995.

6. Гранично допустимі концентрації /ГДК/ токсичних речовин у буряковому пектині та їх зниження /Л.Д.Вобрівник, М.С.Карпович, М.І.Сороколіт, Ю.Ю.Куянов та ін./ /Цукор України.1995, N 3. - С.31-33/.

АННОТАЦІЯ

Куянов Ю.Ю. Гидролиз пектиновых веществ из яблочного сырья с использованием СВЧ-энергии.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 - Процессы и аппараты пищевых производств, Украинский государственный университет пищевых технологий, Киев, 1996 г.

Защищается диссертация, содержащая результаты теоретических и экспериментальных исследований по совершенствованию технологии и оборудования для производства пектина, в частности для обеспечения нужд пектинопрофилактики населения. Разработана технология гидролиза яблочного жом собственным соком (его водным раствором) при гидромодуле  $0,2 < q < 4$  и использовании СВЧ-нагрева сырья в течение гидролиза и экстрагирования. Предложен способ гидролиза и разработано оборудование для его осуществления в периодическом и непрерывном режимах работы. Результаты исследований прошли испытания в промышленных условиях АСП "Колос" Смелянского района Черкасской области, которые подтвердили возможность использования разработок в условиях малых предприятий для нужд пектинопрофилактики.

Kuyanov U.U.

#### Annotation

Pectin substances hydrolysis of apple raw material using SHF energy.

The thesis for obtaining the candidate's technical sciences degree, speciality 05.18.12 - Processes and apparatus of food production, Ukrainian State University of Food Technologies, Kiev, 1996.

The thesis containing the theoretical and experimental researches concerning technology perfection and equipment for pectin production specifically to meet the requirements in pectin preventive inspection of population is defended.

The technology of apple husks hydrolysis by means of its own juice (its aqueous solution) with  $0,2 < q < 4$  hydromodulus and the usage of SHF raw materials heating within hydrolysis and extracting is worked up.

A hydrolysis way is offered and the equipment for its realization in periodic and continuous rate of work is worked up.

The results of this research stood the tests under industrial conditions in AJV "Kolos", Smelyansky district, Cherkassy region and the tests confirmed the possibility of using these researches under the conditions of small enterprises for the needs of pectin preventive inspection.

Ключові слова: пектин, гідроліз, екстрагування, пектиновий екстракт, НВЧ-поле, яблучний жом.

*U. U. Kuyanov*

АВ 36.774

**АВТОРЕФЕРАТ**

Відповідальний за випуск В. Л. Зав'ялов

Підписано до друку 24.12.96. Формат 60x84/16. Папір друкарський. Офсетний друк. Умовн. друк.  
арк. 1,16. Умовн. фарб.-відб. 1,16. Тираж 110. Замовлення N 1205. Замовлене.

ЗАТ Видавництво «Поліграфіст», 320070, м. Дніпропетровськ, вул. Серова, 7.