

УДК 664.162.1

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.2.19>

## ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ФЕРМЕНТАТИВНОЇ КОНВЕРСІЇ КРОХМАЛЮ З МЕТОЮ ОДЕРЖАННЯ МАЛЬТИНУ

**Деменюк О. М.** – кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри технології цукру і підготовки води  
Національного університету харчових технологій  
ORCID ID: 0009-0009-8640-6055

**Грабовська О. В.** – доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри технології і організації ресторанного господарства  
Державного торговельно-економічного університету  
ORCID ID: 0000-0001-6462-3790  
Researcher ID: E-4776-2019

**Сабадаш Н. І.** – кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри технології жирів, хімічних технологій  
харчових добавок та косметичних засобів  
Національного університету харчових технологій  
ORCID ID: 0000-0002-1457-0616

Особливим попитом у харчовій промисловості користуються мальтини з низьким ступенем розщеплення (5...8 %). Вони є гарними заміниками жиру в продуктах низької жирності і пониженої калорійності, оскільки утворюють м'які терморверсивні драгли, які при підвищеній температурі плавляться, а при низьких температурах знову застигають. За кімнатної температури такі драгли імітують зовнішній вигляд, смак і текстуру, властиву насиченому жиру та багатьом жирним харчовим продуктам.

Аналіз існуючих технологій показує, що всі вони мають один основний недолік – це складність дотримання у промислових умовах температурного режиму зі ступінчастим витримуванням температурних пауз в процесі декстринізації крохмалю. В результаті мінімальних змін у технологічному процесі отримують продукти із властивостями, відмінними від характерних для мальтинів з низьким ступенем розщеплення, втрачається терморверсивна здатність утворюваних драглів.

Проведені нами дослідження способу інтенсифікації ферментативної конверсії крохмалю електромагнітним полем надвисокої частоти (НВЧ) показали його ефективність і перспективність. Спосіб дає можливість досягти повної клейстеризації крохмальних зерен, що не відбувається при використанні інших високотемпературних способів оброблення, оскільки дрібні крохмальні зерна залишаються неклеїстеризованими навіть за температур 120...140 °С. У полі НВЧ процес гідролізу крохмалю прискорюється, порівняно з класичним способом, у 2,5 рази, а дозування ферменту  $\alpha$ -амілази на розріджування зменшується вдвічі.

На основі проведених досліджень, запропоновано удосконалити технологію мальтину, яка заснована на використанні поля надвисокої частоти. Дана технологія мальтину з низьким ступенем розщеплення дозволяє забезпечити очікуваний технологічний результат – інтенсифікацію процесу шляхом застосування енергії НВЧ та високу якість мальтину за рахунок миттєвої клейстеризації і розріджування крохмалю ферментами. Отримані мальтини здатні затримувати кристалізацію, при нагріванні плавитися та відновлюватись при охолодженні, що дає змогу застосовувати їх в якості наповнювачів та формуючих агентів у виробництві майонезу, морозива, десертів.

Структуру одержаного мальтину досліджували за допомогою Raman-спектроскопії. Спектри комбінаційного розсіювання дозволили вивчити конформаційні зміни мальтину у порівнянні з нативним крохмалем у розчинах та драглях, явища гідратації та асоціації їх молекул. Отримані спектри дали змогу пояснити причину зміни форми полісахаридного ланцюга мальтину. Наслідком вказаних змін є відмінності ступенів гідратації крохмалю

і мальтину. В свою чергу, цим можна пояснити значні відмінності у здатності до структуроутворення даних полісахаридів.

**Ключові слова:** декстринізація крохмалю, амілолітичні ферменти, модифікований крохмаль, мальтин, поле НВЧ.

***Demenyuk O. M., Hrabovska O. V., Sabadash N. I. The intensification of the process of enzymatic conversion of starch with the purpose of obtaining maltin***

*Maltins with a low degree of cleavage (5...8 %) are in particular demand in the food industry. They are good substitutes for fat in low-fat and low-calorie products, as they form soft thermoreversible gels that melt at high temperatures and solidify again at low temperatures. At room temperature, these gels mimic the appearance, taste, and texture of saturated fats and many fatty foods.*

*The analysis of the existing technologies shows that they all have one main drawback – it is the difficulty of maintaining the temperature regime in industrial conditions with stepwise endurance to temperature pauses in the process of starch dextrinization. As a result of minimal changes in the technological process, products with properties different from those characteristic of maltin with a low degree of cleavage are obtained, the thermoreversibility of the resulting gels is lost.*

*Our studies of the method of intensification of starch dextrinization by the microwave field showed its effectiveness and perspective.*

*It allows you to achieve complete klesterization of starch granules, which is impossible to do using other high-temperature intensification methods, since small starch granules remain unklesterization even at temperatures of 120...140 °C. In the microwave field, the starch hydrolysis process is accelerated by 2.5 times compared to the classical method, and to reduce the dosage of  $\alpha$ -amylase enzyme by half.*

*On the basis of the conducted research, an improved technology of maltin is proposed, which is based on the use of an ultrahigh frequency field. This technology of maltin with a low degree of splitting allows to ensure the expected technological result – intensification of the process through the use of microwave energy and high quality of maltin due to instant klesterization and hydrolysis of starch by enzymes. The obtained maltins are able to restrain crystallization, melt when heated and recover when cooled, which makes it possible to use them as fillers and forming agents in the production of mayonnaise, ice cream, and desserts.*

*The structure of the obtained maltin was studied using Raman-spectroscopy. Raman scattering spectra made it possible to study the conformational changes of maltin in comparison with native starch in solutions and in gels, hydration phenomena and association of their molecules. The obtained spectra made it possible to explain the reason for the change in the shape of the polysaccharide chain of maltin. The consequence of these changes is the difference in the degree of hydration of starch and maltin. In turn, this can explain significant differences in the ability to structure these polysaccharides.*

**Key words:** starch dextrinization, amylolytic enzymes, modified starch, maltin, microwave field.

**Вступ.** Останнім часом в світі велика увага приділяється виробництву харчових продуктів пониженої калорійності. У якості заміника жиру в цих продуктах використовують мальтодекстрин, отриманий шляхом оброблення крохмалю ферментними препаратами. Мальтодекстрин є харчовою добавкою, що використовується у якості наповнювача, стабілізатора, структуроутворювача та заміника жиру в низькокалорійних продуктах. Саме тому, дослідження ефективних способів отримання мальтодекстрину є актуальним.

Із усього розмаїття декстринів, що виробляються в світі виділяють [1; 2] п'ять основних груп:

1) декстрини, що одержують шляхом термооброблення (піролізом) сухого крохмалю без каталізаторів (палевий декстрин);

2) декстрини, що одержують піролізом сухого крохмалю з додаванням кислотних каталізаторів (білий і жовтий декстрини);

3) декстрини, що одержують піролізом сухого крохмалю з додаванням лужних каталізаторів;

4) декстрини, що одержують гідролізом суспензії крохмалю із застосуванням кислотних каталізаторів;

5) декстрини, що одержують гідролізом суспензії крохмалю із застосуванням амілолітичних ферментних препаратів у якості каталізаторів.

Останні декстрини широко використовуються у різних галузях харчової промисловості і називаються мальтодекстринами. Мальтодекстрин – відноситься до модифікованого крохмалю і є харчовою добавкою без смаку і запаху, яку одержують шляхом ферментативної конверсії крохмалю. Ступінь гідролізу крохмалю, який визначається відношенням вмісту редукувальних речовин до маси сухих речовин (ГЕ), при одержанні мальтодекстрину становить близько 20 %.

Мальтодекстрини одержують ферментативним гідролізом крохмальної суспензії концентрацією 25...30 % із застосуванням бактеріальної  $\alpha$ -амілази за рН 6,3...6,5 і температури 55...60 °С [3; 4]. Відомо, що в залежності від величини глюкозного еквівалента властивості мальтодекстринів суттєво змінюються [1–4]. За значень ГЕ 15 % і вище з'являється солодкість і зменшується в'язкість.

Особливим попитом у харчовій промисловості користуються мальтодекстрини з низьким ступенем розщеплення (ГЕ 5...8 %) – мальтини. Вони є гарними заміниками жиру в продуктах низької жирності і пониженої калорійності [5]. Мальтини містять в основному полісахариди крохмалю із середньою молекулярною масою, включаючи деяку частину коротких амілозоподібних молекул з прямим ланцюгом. Такі молекули мають тенденцію асоціювати у водній емульсії формуючи драгли. Проте, вони занадто короткі для того, щоб сформувати незворотні драгли, так як це відбувається в крохмальних ланцюгах з великою молекулярною масою. Крім того, вони містять деяку кількість олігосахаридів з низькою молекулярною масою, які залишаються в розчині і стримують формування драглів [6; 7].

В результаті при концентрації вище 20 % утворюються м'які термореверсивні драгли, які при підвищеній температурі плавляться, а при низьких температурах знову застигають. За низьких і середніх температур (навіть за кімнатної) драгли імітують зовнішній вигляд, смак і текстуру властиву жирам та багатьом жирним харчовим продуктам.

Вперше технологія мальтину була розроблена у Німеччині, як нового і досить перспективного для харчової промисловості драглеутворювального мальтодекстрину. В основі технології мальтину також лежить ферментативний гідроліз крохмалю, переважно картопляного. У водну суспензію крохмалю з масовою часткою сухих речовин 25...30 % з рН 6,5 дозують бактеріальну  $\alpha$ -амілазу (амілосубтилін Г10х) з розрахунку 0,1 одиниця активності ферменту на грам сухих речовин крохмалю (од. ак./г СР). Далі суміш підігривають за наступним температурним режимом: підігрів до 59 °С і пауза 15 хв; підігрів до 63,5 °С – пауза 5 хв; підігрів до 65 °С – пауза 5 хв; підігрів до 68 °С – пауза 5 хв; підігрів до 90 °С зі швидкістю 1,5 °С за хвилину.

З приведеного температурного режиму видно, що спочатку суспензія прогрівається до температури, при якій набухають крохмальні гранули (до 70 °С). Далі крохмаль гідролізується протягом короткого часу. Спочатку гідролізується крохмаль, що знаходиться у розчині. Він розщеплюється ферментом значно швидше і повніше. Інша частина крохмальних полісахаридів знаходиться у вигляді твердої фази, тобто поряд з гомогенним має місце гетерогенний гідроліз.

В результаті наявності двох різних форм фізичного стану субстрату ферментативне розщеплення приводить до одержання продуктів гідролізу з певним розподіленням молекул за розміром: моносахариду глюкози – менше 0,3 %; олігосахаридів зі ступенем полімеризації до 6 – менше 1,5 %; олігосахаридів з молекулярною масою  $9,2 \cdot 10^3$  – 10...14 %; декстринів середньої молекулярної маси

12...30·10<sup>3</sup> – приблизно 31...32 %; з молекулярною масою 60...80·10<sup>3</sup> – 10...16 %, високомолекулярної фракції зі ступенем полімеризації 200÷600·10<sup>3</sup> – 34...36 % [3; 5].

Основною відмінною властивістю мальтину у порівнянні з мальтодекстринами і крохмалем є те, що перший утворює з водою драгли з нейтральним смаком, які стійкі до заморожування і відтавання. Консистенція драглів мальтину змінюється від пастоподібної (за концентрації 20...35 %) до мічної на розріз (за концентрації 35...50 %). При нагріванні драглів або розчинів мальтину до 70...80 °С отримують майже прозорі розчини, які при наступному охолодженні знову дають міцний гель. Цю операцію можна проводити багаторазово [2; 3; 7].

Пізніше була розроблена технологія виробництва мальтинів з низьким глюкозним еквівалентом. Авторами запропоновано оброблення суспензії не тільки картопляного, але і кукурудзяного крохмалю бактеріальною  $\alpha$ -амілазою в одну стадію при нагріванні зі швидкістю 1,5 °С за хвилину до 85 °С з однією 15-хвилинною температурною паузою при 58...60 °С. Замість кип'ятіння продукту протягом 15 хв після закінчення гідролізу його піддають термообробленню при 110...115 °С протягом 1...3 хв з метою інактивації ферменту. Автори технології запевняють, що чим нижче ступінь розщеплення крохмалю, тим вище драглеутворювальна здатність, в'язкість продукту, здатність запобігати кристалізації цукрів, але нижчі солодкість та гігроскопічність [3].

Аналіз розглянутих технологій показує, що всі вони мають один основний недолік, який ускладнює їх використання у промисловості – це складність дотримання у промислових умовах температурного режиму зі ступінчастим витриманням температурних пауз в процесі розріджування крохмалю [1; 3–5]. Навіть незначні зміни технологічного режиму призводять до одержання продуктів, що не мають термореверсивних властивостей [2; 3; 5; 7].

**Метою роботи.** Удосконалення технології мальтину з низьким ступенем розщеплення шляхом інтенсифікації процесу ферментативної декстринізації картопляного крохмалю.

**Матеріали та методи.** Для досліджень процесу декстринізації використовували картопляний крохмаль виробництва ПБП «Вимал» (м. Чернігів) вироблений згідно ДСТУ 4286:2004; гідролітичний ферментний препарат термостабільної  $\alpha$ -амілази Spezyme Fred (фірми “Genencor”), процес гідролізу здійснювали в лабораторних умовах за допомогою термостату. Оброблення гідролікатів у електромагнітному полі надвисокої частоти проводили за допомогою НВЧ-печі фірми Panasonic максимальної потужності 800 Вт. Загальний вміст редукувальних речовин (РР) у % до маси та глюкозний еквівалент (ГЕ) визначали за методом Вільштеттера та Шудля; рН і вміст сухих речовин (СР, % до маси продукту) визначали загальноприйнятими стандартними методами.

**Результати дослідження.** З метою встановлення впливу мікрохвильового випромінювання на процес ферментативної декстринізації крохмалю було проведено дослідження з вивчення і порівняння процесу ферментативної конверсії крохмалю в умовах термостату та поля НВЧ. З метою порівняння провели розріджування суспензії картопляного крохмалю (100 мл) з масовою часткою сухих речовин 30 % з використанням  $\alpha$ -амілази (Spezyme Fred дозованої у кількості 4 од. ак./г СР крохмалю) за рН оптимального для дії ферменту (рН = 4,5...5,0) у термостаті і у полі НВЧ, процес зупиняли після повного розріджування крохмальної суспензії, яке характеризували зменшенням в'язкості і досягненням значення ГЕ 20 %. У полі НВЧ потужністю 600 Вт ферментативне розріджування крохмалю відбулося за 2 хвилини: протягом 1 хв пройшла повна клейстеризація

крохмальних зерен, а ще за 1 хв – клейстер повністю розрідився. Процес ферментативного розріджування у термостаті проводили протягом 5 хв: 2 хв витратили на клейстеризацію суспензії, а 3 хв на повне розріджування крохмального клейстеру. У процесі були відібрані проби, у яких визначили величину глюкозного еквіваленту, за одержаними даними побудовано криві розріджування у термостаті і у полі НВЧ (рис. 1).

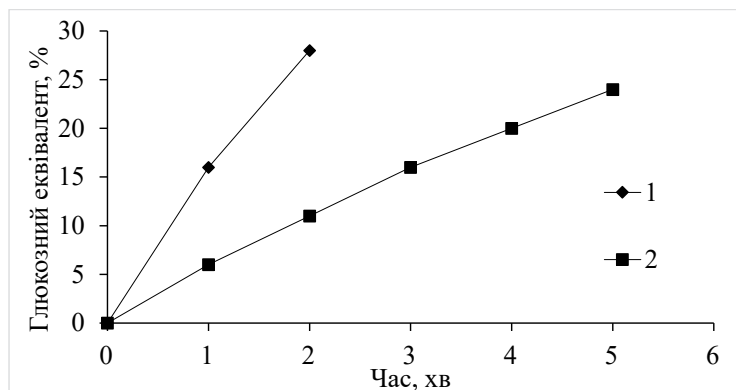


Рис. 1. Порівняння ферментативного розріджування крохмалю у полі НВЧ (1) і у термостаті (2)

З графіку видно, що процес ферментативного розріджування крохмалю із застосуванням поля НВЧ здійснюється інтенсивніше, ніж у термостаті. У гідролізаті, обробленому мікрохвильовим випромінюванням, значно менше завислих непрогідролізованих часток крохмалю, гідролізат прозорий і майже не схильний до ретроградації. Це пояснюється прискореним розріджуванням крохмалю у полі НВЧ, за якого вдається уникнути накопичення амілозоподібних декстринів з критичним розміром молекул, які найбільше здатні до ретроградації, відбувається швидкий розрив молекул полісахаридів до низькомолекулярних вуглеводів не схильних до ретроградації.

Особливості ферментативного розріджування крохмалю у полі НВЧ зумовлені діелектричним нагрівом. До переваг діелектричного нагріву дії поля НВЧ відносяться висока концентрація енергії в одиниці об'єму, що призводить до потужного об'ємного нагріву гідролізату, безінерційність вмикання і вимикання потоку енергії, коефіцієнт корисної дії перетворення електромагнітної енергії в теплоту наближений до 100 %. Крім того, діелектричний нагрів дозволяє створювати такий розподіл теплоти у об'єктах, які неможливі при звичайному нагріванні. Як показали експерименти, застосування енергії НВЧ дає можливість майже втричі прискорити процес ферментативного розріджування крохмалю у порівнянні із звичайним способом нагрівання.

З метою встановлення питомих витрати енергії НВЧ на декстринізацію крохмалю було проведено наступну серію експериментів. Використовуючи крохмальну суспензію концентрацією 35 %, термостабільну  $\alpha$ -амілазу Spezyme Fred у кількості 4 од. ак./г СР, провели ферментативний гідроліз крохмалю у полі НВЧ потужністю 600 Вт чотирьох проб об'ємом 100, 200, 300 і 400 мл. Процес проводили до повного розріджування крохмалю, що тривало 20...180 сек.

Під час процесу відбирали проби гідролізатів, у яких визначали ГЕ. За отриманими даними побудували кінетичні криві розріджування крохмалю (рис. 2). З кривих видно, що зі збільшенням об'єму суспензії, збільшується тривалість розріджування, а відповідно знижується швидкість процесу.

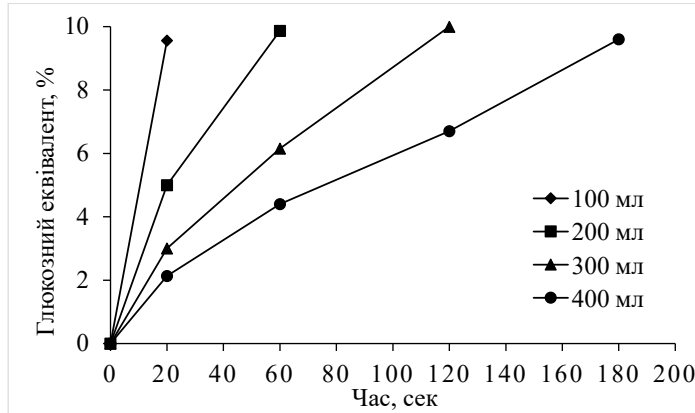


Рис. 2. Вплив об'єму крохмальної суспензії на тривалість розріджування у полі НВЧ

З метою встановлення залежності між тривалістю розріджування крохмалю і об'ємом суспензії було розраховано питомі витрати енергії надвисокої частоти на процес ферментативного розріджування крохмалю. Розрахунок проводили за формулою:

$$PE = \frac{N\tau}{V}, \quad (1)$$

де  $PE$  – питомі витрати енергії, Вт·с/см<sup>3</sup> (Дж/см<sup>3</sup>);  $N$  – потужність поля, Вт;  $\tau$  – тривалість розріджування, с;  $V$  – об'єм суспензії, см<sup>3</sup>.

Розрахувавши питомі витрати енергії для кожного дослідного розріджування, отримали дані, які наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

**Залежність між тривалістю розріджування у полі НВЧ і об'ємом суспензії крохмалю**

Об'єм суспензії, см <sup>3</sup>	Тривалість розріджування, с	Питомі витрати енергії, Дж/см <sup>3</sup>
100	40	240
200	100	300
300	120	240
400	180	270

Отже, на основі отриманих результатів встановлено, що питомі витрати енергії надвисокої частоти на процес гідролізу крохмалю складають 240...300 Дж/см<sup>3</sup> суспензії (за концентрації крохмальної суспензії 35 %).

З метою визначення оптимальної витрати  $\alpha$ -амілази на процес декстринізації суспензії картопляного крохмалю у полі НВЧ і порівняння її з дозуванням

$\alpha$ -амілази на даний процес у термостаті, було проведено серію експериментів з однаковою кількістю крохмальної суспензії (100 мл), що містить однакову масову частку крохмалю (концентрація 35 % СР), та з різною кількістю (від 1 до 5 од. ак./г СР) термостабільного ферменту. Розріджування проводили паралельно в усіх пробах за однакових умов протягом 2 хв у полі НВЧ (при питомих витратах енергії 240 Дж/см<sup>3</sup>), а по закінченню визначили в них величину ГЕ.

Використовуючи експериментальні дані було побудовано графік залежності ГЕ від витрати ферменту  $\alpha$ -амілази на розріджування картопляного крохмалю (тобто на досягнення ГЕ 20 %) (рис. 3), з якого видно, що оптимальним є дозування ферменту для процесу у полі НВЧ в кількості 2 од. ак./г СР крохмалю, що майже вдвічі менше, ніж для розріджування у термостаті. Подальше збільшення кількості доданого ферменту не сприяє підвищенню ГЕ гідролізатів, а призводить лише до збільшення матеріальних витрат на процес.

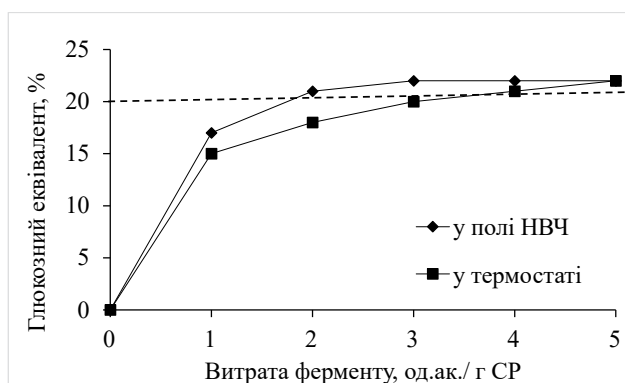


Рис. 3. Залежність ГЕ від дозування термостабільної  $\alpha$ -амілази на розріджування крохмалю у полі НВЧ та в термостаті

В результаті проведених експериментів можна зробити висновок, що застосування поля НВЧ для процесу ферментативної конверсії крохмалю є досить ефективним та перспективним способом інтенсифікації процесу. Спосіб дає можливість досягти повної клейстеризації крохмальних зерен, що не відбувається при використанні інших високотемпературних способів оброблення, оскільки дрібні крохмальні зерна залишаються неклеїстеризованими навіть за температур 120...140 °С. У полі НВЧ процес гідролізу крохмалю прискорюється, порівняно з класичним способом, у 2,5 рази, а дозування ферменту  $\alpha$ -амілази на розріджування зменшується вдвічі.

На основі проведених досліджень було розроблено спосіб виробництва мальтинів шляхом ферментативної декстринізації крохмалю у електромагнітному полі НВЧ, яке сприяє інтенсифікації процесу та одержанню високоякісного мальтину за рахунок повної миттєвої клейстеризації та розріджування крохмалю.

Було проведено серію досліджень ферментативного гідролізу картопляного крохмалю у полі НВЧ з метою одержання мальтинів і встановлено оптимальні умови процесу. Мальтини з найкращими якісними показниками одержували таким чином: готували по 200 см<sup>3</sup> суспензії картопляного крохмалю з вмістом сухих речовин 30...35 %, додаванням соляної кислоти встановлювали оптимальне рН суспензії 5,5...5,7 для дії термостабільної  $\alpha$ -амілази Spezyme FRED.

Препарат дозували з розрахунку 0,3...0,5 од. ак./г СР крохмалю. Суміш ретельно перемішували. Гідроліз проводили при застосуванні енергії НВЧ у кількості 240...300 Дж/см<sup>3</sup>, тобто 200 см<sup>3</sup> суспензії обробляли у мікрохвильовій печі потужністю 600 Вт впродовж 1,0...1,5 хв. Для припинення подальшого гідролізу фермент інактивували додаванням у отриманий гідролізат розчину соляної кислоти до рН 3,5 та витримували впродовж 20 хв, потім суміш нейтралізували розчином карбонату натрію (кальцинованої соди) до рН 6, центрифугували, очищали за допомогою активного вугілля та висушували у розпилювальній сушарці. Вихід мальтину з низьким ступенем розщеплення (ГЕ 10 %) становив 80 г.

При вмісті сухих речовин у крохмальній суспензії менше 30 % збільшуються енерговитрати на випарювання розчину мальтину. У разі використання для гідролізу крохмальної суспензії, що містить понад 40 % сухих речовин, розріджування у полі НВЧ відбувається нерівномірно в результаті підвищення в'язкості суспензії, гідролізат стає не технологічним, тобто не придатним для подальшого перероблення. Проте, слід відмітити, що застосування енергії НВЧ для розріджування крохмалю дає можливість використовувати суспензію більш концентровану, ніж при класичному нагріванні. Дозування ферменту понад 0,5 од. ак./г СР крохмалю призводить до більш глибокого ступеню конверсії крохмалю, а отриманий продукт має низьку в'язкість та втрачає здатність стабілізувати структури та антикристалізаційні властивості. При меншому дозуванні ферменту розріджування суспензії не відбувається, продукт має дуже високу в'язкість та стає нетехнологічним. Для гідролізу крохмалю використовували саме термостабільну  $\alpha$ -амілазу, яка витримує температуру 100...110 °С, щоб забезпечити можливість проведення процесу за температури кипіння суспензії 95...98 °С у полі НВЧ без суттєвої інактивації ферменту протягом декількох хвилин.

Запропонована технологія мальтину з низьким ступенем розщеплення дозволяє забезпечити очікуваний технологічний результат – інтенсифікацію процесу шляхом застосування енергії НВЧ та високу якість мальтину за рахунок миттєвої клейстеризації і розріджування крохмалю ферментами у полі НВЧ. Отримані мальтини здатні при нагріванні плавитися та відновлюватись при охолодженні, затримувати кристалізацію цукрів, що дає змогу застосовувати їх в якості наповнювачів та формуючих агентів у виробництві майонезу, морозива, десертів, безалкогольних напоїв та ін.

Структурну будову одержаного мальтину досліджували за допомогою Раман-спектроскопії (рис. 4). Спектри комбінаційного розсіювання дозволяють вивчати конформаційні зміни полісахаридів у розчинах та у драгках, явища гідратації та асоціації молекул.

Структурна організація молекул регулярних полісахаридів в основному визначається трьома параметрами – кутами обертання навколо глюкозидних зв'язків  $C_1-O(\varphi)$  і  $O-C_4'(\psi)$  та величиною валентного кута ( $\alpha$ ) у глюкозидному зв'язку сусідніх піранозних циклів. Внаслідок того, що взаємодія сусідніх піранозних циклів достатньо велика, величина валентного кута ( $\alpha$ ) у глюкозидному зв'язку може варіюватись в інтервалі від 110 до 122 ° і при цьому має місце зміна форми потенційної функції полімерної молекули, яка визначає амплітуду обертальних коливань. Витягнута вздовж одного із напрямків потенційна функція означає можливість обертальних коливань великої амплітуди, причому асиметричних, які можуть дестабілізувати структурну організацію регулярного ланцюга полісахариду. Кути обертання навколо глюкозидних зв'язків  $C_1-O(\varphi)$  і  $O-C_4'(\psi)$  повністю описують конформаційні стани даних піранозних циклів полісахариду.



Найбільші зміни мають місце для валентних коливань гідроксильних груп, валентних коливань  $\text{C-H}$ - і  $\text{C-H}_2$ - груп та маятникових коливань  $\text{C-H}_2$ - груп ( $730 \text{ cm}^{-1}$ ). Усі вказані зміни спектру свідчать про те, що в результаті гідролізу при зменшенні довжини полісахаридного ланцюга, вірогідно, змінюється величина валентного кута ( $\alpha$ ) в глюкозидному зв'язку і, як наслідок, змінюється форма потенційної функції полімерної молекули, яка визначає амплітуду обертальних коливань.

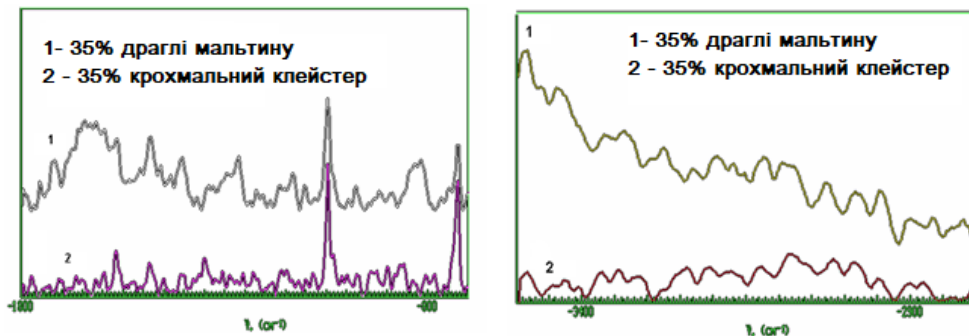


Рис. 4. Раман-спектри мальтину (1) та клейстеризованого нативного крохмалю (2) (вміст СР 35 %)

В результаті цього маємо витягнуту вздовж одного із напрямків потенціальну функцію, що означає можливість обертальних коливань великої амплітуди, асиметричних, які можуть дестабілізувати структурну організацію регулярного ланцюга полісахариду. Таким чином, можливо пояснити значні зміни інтенсивності, форми та положення смуг валентних коливань гідроксильних груп, що утворюють водневі зв'язки різної міцності, маятникових коливань груп  $\text{C-H}_2$ - ( $730 \text{ cm}^{-1}$ ) і валентних коливань  $\text{C-H}$ - і  $\text{C-H}_2$ - груп. Даний механізм пояснює причину зміни форми полісахаридного ланцюга мальтину. Наслідком вказаних змін є відмінності у ступені гідратації крохмалю і мальтину, на що і вказують всі зміни спектру. В свою чергу цим можна пояснити значні відмінності у здатності до структуроутворення даних полісахаридів.

Мальтини відрізняються від традиційного крохмалю ступенем гідрофільності, підвищеною здатністю до клейстеризації, гелеутворення, умовами розчинення, тому у ролі стабілізаторів дають високий технологічний ефект. Мальтини містять у своєму складі короткі амілозоподібні молекули з лінійним ланцюгом. Ці молекули схильні асоціювати у водній емульсії, формуючи драглі. Проте вони занадто короткі, щоб формувати незворотні драглі, як крохмальні молекули великої молекулярної маси. Відомо, що суспензії нативного крохмалю після клейстеризації у концентрації 8...12 % утворюють стійкі драглі [2; 4]. Ця властивість притаманна також різним модифікованим видам крохмалю. Проте ці продукти не можна використовувати в якості носіїв консистенції, оскільки їхня структура руйнується в процесі приготування під дією високих температур, вони мають клейкі властивості та характерний крохмальний смак. Мальтини з низьким ГЕ (5...8 %) містять невелику кількість розгалужених олігосахаридів, що затримують формування драглі. Внаслідок такої будови, за умови концентрації мальтину у розчині понад 25 % утворюються пластичні термореверсивні драглі. Саме ці властивості зумовлюють використання мальтинів як заміників жиру.

**Висновки.** На основі проведених досліджень щодо інтенсифікації процесу ферментативної конверсії крохмалю з метою одержання мальтину з низьким ступенем розщеплення встановлено, що у полі НВЧ процес в 2,5 рази прискорюється, порівняно з класичним способом, а дозування ферменту  $\alpha$ -амілази зменшується вдвічі. В результаті роботи розроблено технологію мальтинів, засновану на біо-конверсії крохмалю у полі НВЧ.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Quintero J.A. Analysis and characterization of starchy and cellulosic materials after enzymatic modification / J.A. Quintero, J.A. Dávila, J. Moncada, O.H. Giraldo, C.A. Cardona. *DYNA*. 2016. № 83(197). PP. 44–51. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n197.42729>.
2. Li Z. The effect of starch concentration on the gelatinization and liquefaction of corn starch / Z. Li, W. Liu, Z. Gu, C. Li, Y. Hong. *Food Hydrocolloids*. 2015. № 48. PP. 189-196. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.02.030>
3. Bangar S.P. Enzymatic modification of starch: A green approach for starch applications. / S.P. Bangar, A.O. Ashogbon, A. Singh, V. Chaudhary, W.S. Whiteside. *Carbohydrate Polymers*. 2022. № 287. 119265. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119265>
4. Ahmad I. Microstructural study of enzymatically and non-enzymatically hydrolyzed potato powder. / I. Ahmad, Z. Xiong, X. Hanguo, F. Lyu, R.M. Aadil, N. Khalid, N. Walayat, M.I. Taj, G. Zhang, W. Tang, Y. Li, M. Li. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022. № 46 (11). e16998. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16998>
5. Mohamed A. Physicochemical Properties of Enzymatically Modified Starches / A. Mohamed, H. Alqah, M. Alamri, S. Hussain, A. Qasem, M. Ibraheem, H. Yehia, G. Shamlan. *Processes*. 2021. № 9(12). 2251. <https://doi.org/10.3390/pr9122251>
6. Mondal S. Microbial Amylase: Old but still at the forefront of all major industrial enzymes / S. Mondal, K. Mondal, S.K. Halder, N. Thakur, K.C. Mondal. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2022. № 45. 102509. <https://doi.org/10.1016/j.cbab.2022.102509>
7. Alqah H. Effect of annealing and  $\alpha$ -amylase extract on the rheological properties, syneresis, and water holding capacity of different starches. / H. Alqah, M.S. Alamri, A.A. Mohamed, S. Hussain, A.A. Qasem, M.A. Ibraheem, H.M. Yehia. *Food Science and Technology*. 2022. № 42. <https://doi.org/10.1590/fst.83821>
8. Zhong Y. Generation of short-chained granular corn starch by maltogenic  $\alpha$ -amylase and transglucosidase treatment / Y. Zhong, T. Keeratiburana, J.J.K. Kirkensgaard, B. Khakimov, A. Blennow, A.R. Hansen. *Carbohydrate Polymers*. 2021. № 251. 117056. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117056>

### REFERENCES:

1. Quintero J.A., Dávila J.A., Moncada J., Giraldo O.H., & Cardona C.A. (2016). Analysis and characterization of starchy and cellulosic materials after enzymatic modification. *DYNA*. 83 (197), 44–51.
2. Li Z., Liu W., Gu Z., Li C., & Hong Y. (2015). The effect of starch concentration on the gelatinization and liquefaction of corn starch. *Food hydrocolloids*. 48, 189–196.
3. Bangar S.P., Ashogbon A.O., Singh A., Chaudhary V., & Whiteside W.S. (2022). Enzymatic modification of starch: A green approach for starch applications. *Carbohydrate polymers*. 287. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119265>.
4. Ahmad I., Xiong Z., Hanguo X., Lyu F., Aadil R.M., Khalid N. & et al. (2022). Microstructural study of enzymatically and non-enzymatically hydrolyzed potato powder. *Journal of Food Processing and Preservation*. 46 (11). Retrieved from <https://doi.org/10.1111/jfpp.16998>.
5. Mohamed A., Alqah H., Alamri M., Hussain S., Qasem A., Ibraheem M. & et al. (2021). Physicochemical properties of enzymatically modified starches. *Processes*. 9(12). Retrieved from <https://doi.org/10.3390/pr9122251>.

6. Mondal S., Mondal K., Halder S.K., Thakur N., & Mondal K.C. (2022). Microbial Amylase: Old but still at the forefront of all major industrial enzymes. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*. 45. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102509>.
  7. Alqah H., Alamri M.S., Mohamed A.A., Hussain S., Qasem A.A, Ibraheem M.A. & et al. (2022). Effect of annealing and  $\alpha$ -amylase extract on the rheological properties, syneresis, and water holding capacity of different starches. *Food science and technology*. 42. Retrieved from <https://doi.org/10.1590/fst.83821>
  8. Zhong Y., Keeratiburana T., Kirkensgaard J.J.K., Khakimov B., Blennow A., & Hansen A.R. (2021). Generation of short-chained granular corn starch by maltogenic  $\alpha$ -amylase and transglucosidase treatment. *Carbohydrate polymers*. 251. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117056>.
-