

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL MODES OF COLD ACID HYDROLYSIS OF POTATO STARCH

M. Alekseenko

Scientific-Practical Center for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

V. Litvyak, A. Sysa

Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

E. Hrabovska, O. Galenko

National University of Food Technologies

Key words:

*Starch
Potatoes
Hydrolysis
Paste
Modification*

Article history:

Received 11.05.2020
Received in revised form
22.05.2020
Accepted 02.06.2020

Corresponding author:

V. Litvyak
E-mail:
besserk1974@mail.ru

ABSTRACT

As the object of study, we used native potato starch produced by the VMFA ChMP (Chernihiv, Ukraine) and acid-hydrolyzed potato starch. Acid hydrolysis was carried out for 1—24 hours at 25—55°C, in the presence of HCl at pH 0.1—0.6 N. The content of dry matter of acid-hydrolyzed starch in the supernatant of the filtrate was determined refractometrically, and a gelling ability and fluidity of the paste were also studied. The technological regimes of acid hydrolysis were optimized using the Statistica 8 application software package.

The technological modes of acid hydrolysis (acid concentration, temperature and hydrolysis time) of potato starch were optimized depending on its basic physicochemical properties (amount of dry matter in the supernatant, fluidity and gelling ability of the paste).

It was found that for potato acid-hydrolyzed starch, the minimum fluidity of the paste is at an optimum of 93.9 (processing temperature 23.6°C, processing time 7.9 hours and the concentration of HCl — 0.315 N.), the maximum gelling ability of the paste is after the transition point of 7.6 (temperature treatment time of 36.7°C, processing time of 18.9 hours and a HCl concentration of 0.65 N.), the minimum dry matter in the supernatant is after the transition point of 1.05 (treatment temperature of 39.1°C, processing time of 11.2 hours and HCl concentration 0.44 N.).

The interrelation of technological modes of acid hydrolysis of starch (temperature, acid concentration, time) with the technological characteristics of modified starch (concentration of dry matter in the supernatant of starch suspension, fluidity and gelling ability of starch paste) is found and optimal (maximum and minimum) process points are determined.

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ КИСЛОТНОГО ГІДРОЛІЗУ КАРТОПЛЯНОГО КРОХМАЛЮ

М. С. Алексєєнко

*Науково-практичний центр Національної академії наук Білорусі
з продовольства, м. Мінськ, Республіка Білорусь*

В. В. Літвяк, А. Г. Сиса

Білоруський державний університет, м. Мінськ, Республіка Білорусь

Е. В. Грабовська, О. О. Галенко

Національний університет харчових технологій

У статті як об'єкт дослідження використані нативний картопляний крохмаль виробництва ЧМП «Вітал» (м. Чернігів, Україна) і кислотногогідролізованний картопляний крохмаль. Кислотний гідроліз проводили протягом 1—24 год при 25—55°C, наявності HCl при рН 0,1—0,6 н. Вміст сухих речовин кислотногогідролізованного крохмалю в надосадовій рідині фільтрату визначали рефрактометрично, також проведено дослідження на желювальну здатність і плинність клейстеру. Оптимізацію технологічних режимів кислотного гідролізу здійснювали за допомогою пакета прикладних програм Statistica 8.

Проведена оптимізація технологічних режимів кислотного гідролізу (концентрації кислоти, температури і часу гідролізу) картопляного крохмалю залежно від його основних фізико-хімічних властивостей (кількості сухих речовин у надосадовій рідині, плинності і желювальної здатності клейстеру).

Встановлено, що для картопляного кислотногогідролізованного крохмалю мінімум плинності клейстеру знаходиться в оптимумі 93,9 (температура оброблення 23,6°C, час оброблення 7,9 год і концентрація HCl 0,315 н.), Максимум желювальної здатності клейстеру досягається після точки переходу 7,6 (температура обробки 36,7°C, час обробки 18,9 год і концентрація HCl 0,65 н.), мінімум сухих речовин в надосадовій рідині — після точки переходу 1,05 (температура оброблення 39,1°C, час оброблення 11,2 год і концентрація HCl 0,44 н.).

Знайдено взаємозв'язок технологічних режимів кислотного гідролізу крохмалю (температура, концентрації кислоти, час) із технологічними характеристиками модифікованого крохмалю (концентрація сухих речовин у надосадовій рідині крохмальної суспензії, плинність і желювальна здатність крохмального клейстеру) і визначено оптимальні (максимальні і мінімальні) точки процесу.

Ключові слова: крохмаль, картопля, клейстер, модифікація, гідроліз.

Постановка проблеми. Питання удосконалення процесів отримання модифікованих крохмалів є актуальними як серед виробників, так і серед науковців, що підтверджується значною кількістю наукових статей у провідних наукових журналах [1—9].

Вперше каталітичні реакції отримання глюкози при нагріванні крохмалю з розбавленої сірчаної кислоти були відкриті в 1811 р. К. С. Кірхгофом [10]. Оп-

тимізація процесу кислотного гідролізу для вивільнення вільної глюкози із крохмалю і нині залишається актуальною науковою проблемою [11; 12].

Багато відомих на сьогодні методів кислотного гідролізу крохмалю засновані на каталітичній реакції К. С. Кірхгофа [10] і пов'язані з попередньою клейстеризацією крохмалю, тобто з руйнуванням крохмальних гранул [10—14]. Оптимізаційні аспекти крохмального гідролізу в основному визначаються як скорочення витрат на процес клейстеризації (руйнування крохмальних гранул) для подальшого розщеплення полімерних ланцюгів крохмалю за допомогою мінеральної кислоти або амілолітичного ферменту [13]. Так, наприклад, відомий спосіб гідролізу крохмалю під тиском [14].

Руйнування надмолекулярної (гранулярної) структури крохмалю, яке здійснюється при клейстеризації, суттєво змінює властивості крохмалю [2; 15]. Крохмальний клейстер не технологічний. Клейстер важко обезводити та сушити (в ньому міститься багато зв'язаної води), він володіє підвищеною адгезією (липкістю), має обмежені терміни зберігання тощо. Надмолекулярна (гранулярна) структура має значний вплив на прояв фізико-хімічних властивостей крохмалю [16]. При отриманні модифікованих крохмалів (крохмалів з цілеспрямовано зміненими фізико-хімічними властивостями) в більшості випадків необхідне збереження крохмальних гранул [1; 17; 18].

Останнім часом відомі одиничні праці, присвячені питанню зменшення молекулярної маси крохмалю зі збереженням його надмолекулярної (гранулярної) структури. Так, запропонований безперервний електролітичний гідроліз гранульованого картопляного крохмалю за допомогою індуктивної методики [19]. Однак дослідження технології холодного кислотного гідролізу крохмалю, яка здійснюється при температурах нижчих за температуру клейстеризації крохмалю (50°C та нижче), у вільному доступі практично відсутні. Так, була знайдена тільки одна наукова праця, частково присвячена вивченню холодного гідролізу крохмалю, де описується отримання наночастинок кристалічного крохмалю з використанням холодного кислотного гідролізу та ультразвуку [20].

Актуальною проблемою крохмалевиробництва є використання інноваційних технологій для повної безвідходної переробки сировини, зниження собівартості готової продукції для підвищення її конкурентоспроможності та впровадження енергозберігаючих технологій [1; 2; 4].

Мета дослідження: оптимізувати технологічні режими кислотного гідролізу (концентрації кислот, температури і часу гідролізу) картопляного крохмалю залежно від його основних фізико-хімічних властивостей (кількість сухих речовин у надосадковій рідині, плинності та желувальної здатності клейстеру).

Матеріали і методи. Як об'єкт дослідження були використані нативний картопляний крохмаль виробництва ПМП «Вітал» і кислотногогідролізований картопляний крохмаль.

Кислотний гідроліз крохмалю. До наважки крохмалю масою 60 г додавали 77 мл соляної кислоти (HCl) різної концентрації (табл. 1), суміш ретельно перемішували для рівномірного розподілу реагенту по поверхні крохмальних зерен. Процес проводили на водяній бані. Тривалість процесу змінювалася від 3 до 24 год в діапазоні температури від 25 до 55°C. Після закінчення процесу гід-

ролізу суміш нейтралізували розчином кальцінованої соди до рН 4,5—5,0. Далі до отриманого зразка додавали 50 мл спиртової суміші (25 мл C_2H_5OH + 25 мл H_2O), ретельно перемішували, а потім відокремлювали рідку фазу від крохмалю на паперовому фільтрі. Вологий крохмаль рівномірно розподіляли по поверхні фільтра і підсушували в сушильній шафі при температурі 40°C, після цього його просівали і відокремлювали крупку.

Фізико-хімічні методи. Вміст сухих речовин кислотного гідролізованого крохмалю в надосадовій рідині фільтрату визначали рефрактометрично за ISO 1743:1982 [21]. Отримані зразки кислотного гідролізованого крохмалю досліджували на желювальну здатність і плинність клейстеру [22; 23; 24].

Оптимізацію технологічних режимів кислотного гідролізу (концентрація кислоти, температура і тривалість гідролізу) картопляного крохмалю залежно від його основних фізико-хімічних властивостей (кількості сухих речовин у надосадовій рідині, плинність і желювальна здатність клейстеру) здійснювали за допомогою пакета прикладних програм Statistica 8.

У дослідженні обрано центральний композиційний ротатабельний план повного факторного експерименту 23 (ПФЕ ЦКРП 23), оскільки такий тип плану експерименту дає найбільш повну і точну картину про одержувану інформацію та рівномірно розподіляє її по всьому інтервалу факторного простору. При цьому відбувається мінімізація систематичних помилок, пов'язаних з неадекватністю представлення результатів поліномами другого порядку [14; 15].

За отриманими даними в ході проведення експериментальних досліджень складається математична модель, що являє собою відрізок полінома другого порядку:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + \dots + b_k \cdot X_k + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{(k-1)k} \cdot X_{k-1} \cdot X_k + b_{11} \cdot X_1^2 + \dots + b_{kk} \cdot X_k^2,$$

де Y — функція відгуку; b_0 — коефіцієнт рівняння регресії в нульовому значенні; b_1, b_2, \dots, b_k — коефіцієнти при лінійній залежності; $b_{12}, b_{23}, b_{(k-1)k}$ — коефіцієнти при парній взаємодії факторів; X_1, X_2, X_k — фактори варіювання.

Для перевірки математичної моделі на адекватність використовували F -критерій (критерій Фішера) [25; 26], адже цей метод є найбільш зручним статистичним методом для перевірки адекватності моделі і перевірка зводиться до порівняння з табличними значеннями.

Значимість кожного коефіцієнта визначали перевіркою за критерієм Стьюдента [27] за формулою:

$$t = \frac{|b_j|}{S_{\{b_j\}}},$$

де b_j — коефіцієнт при факторах варіювання в рівнянні регресії; $S_{\{b_j\}}$ — квадратична помилка коефіцієнтів регресії.

Для усунення впливу на функцію відгуку систематичних помилок, викликаних зовнішніми умовами, передбачені матрицею планування (табл. 1 і 2) досліді проводилися у випадковій послідовності.

Результати і обговорення. Для кислотного гідролізу крохмалю істотне значення має дотримання технологічного режиму, зокрема таких параметрів: кон-

центрація кислоти, температура і тривалість процесу. Отримані в ході експериментальних досліджень дані дали змогу виконати оптимізацію за допомогою методів математичного моделювання.

На першому етапі були проведені експериментальні дослідження з метою визначення оптимальних меж застосування технологічних параметрів для проведення модифікації (кислотного гідролізу) крохмалю, які надають можливість отримати кислотно-модифікований крохмаль з визначеними фізико-хімічними властивостями. За результатами дослідження було встановлено рівні факторів та інтервали варіювання основних параметрів процесу (табл. 3).

Таблиця 1. Вибір необхідних досліджень за допомогою методу планування експерименту

№ дослідження	Умови проведення кислотного гідролізу			№ дослідження	Умови проведення кислотного гідролізу		
	Температура, °С	Тривалість, год	Концентрація HCl, н.		Температура, °С	Тривалість, год	Концентрація HCl, н.
1	25	3	0,2	11	37,5	1	0,35
2	50	3	0,2	12	37,5	24	0,35
3	25	22	0,2	13	37,5	13	0,1
4	50	22	0,2	14	37,5	13	0,6
5	25	3	0,5	15	37,5	13	0,35
6	50	3	0,5	16	37,5	13	0,35
7	25	22	0,5	17	37,5	13	0,35
8	50	22	0,5	18	37,5	13	0,35
9	20	13	0,35	19	37,5	13	0,35
10	55	13	0,35				

Таблиця 2. Рівні факторів та інтервали варіювання

Рівні факторів	Умови проведення кислотного гідролізу		
	Концентрація HCl, н.	Тривалість, год	Температура, °С
	X_1	X_2	X_3
Нижній рівень	0,2	3	25
Основний рівень	0,35	13	37,5
Верхній рівень	0,5	22	50
Інтервал варіювання	0,1	2	5
Рівень $-α$	0,1	1	20
Рівень $+α$	0,6	24	55

Друга серія дослідів полягала в дослідженні впливу технологічних умов модифікації (кислотного гідролізу) крохмалю: концентрація кислоти, температура і час обробки на властивості отриманого крохмалю. Експерименти проводили згідно з планом трифакторного експерименту другого порядку, який наведено в табл. 1.

Розв'язок задачі оптимізації передбачає розробку математичної моделі для вираження залежності показників кислотно-модифікованого крохмалю від технологічних параметрів процесу. Математичні моделі, отримані при дослідженні технологічних об'єктів, дають змогу вирішувати ряд завдань, серед яких осо-

бливе місце займає задача пошуку оптимальних параметрів проведення процесу в досліджуваному об'єкті.

Для оцінки якості отриманого модифікованого крохмалю були визначені такі властивості і параметри крохмалю: плинність і желювальна здатність клейстеру отриманого кислотногогідролізованого картопляного крохмалю, а також вміст сухих речовин у фільтраті після зневоднення кислотногогідролізованого картопляного крохмалю. Отримані результати зведені в табл. 2.

Таблиця 3. Фізико-хімічні характеристики (плинність і желювальна здатність) клейстеру кислотногогідролізованого картопляного крохмалю (кількість сухих речовин залишається у фільтраті після зневоднення кислотногогідролізованого картопляного крохмалю)

Умови кислотного гідролізу			Плинність, с	Желююча здатність
Концентрація HCl, н.	Тривалість, год	Температура, °C		
0,2	3	50	95	9
0,5	3	50	96	9
0,2	22	50	96	7
0,5	22	50	97	7
0,1	13	37	98	6
0,35	13	37	94	7
0,35	13	37	94	7
0,6	13	37	98	7
0,2	3	25	95	2
0,5	3	25	97	6
0,2	22	25	98	8
0,5	22	25	99	8
0,35	13	55	98	8
0,35	13	20	95	3
0,35	1	37	97	5
0,35	24	37	98	9
Умови кислотного гідролізу			Вміст сухих речовин у фільтраті, %	
Концентрація HCl, н.	Тривалість, год	Температура, °C		
0,2	5,5	48	0,7	
0,5	5,5	48	0,9	
0,2	19,5	48	0,6	
0,5	19,5	48	0,8	
0,15	12,5	37,5	0,1	
0,35	12,5	37,5	0,88	
0,35	12,5	37,5	1	
0,6	12,5	37,5	1	
0,2	5,5	27	0,2	
0,5	5,5	27	1	
0,2	19,5	27	0,2	
0,5	19,5	27	1,2	
0,35	12,5	55	1,4	
0,35	12,5	20	1	
0,35	1	37,5	1	
0,35	24	37,5	0,8	

У цих дослідженнях застосовувався ротатабельний план, для якого дисперсія відгуку є постійною в усіх точках, однаково віддалених від центру плану.

Використані позначення:

X_1 — концентрація соляної кислоти, н.;

X_2 — температура процесу, °С;

X_3 — тривалість процесу, год;

$Y_1(X_1, X_2, X_3)$ — плинність крохмального клейстеру;

$Y_2(X_1, X_2, X_3)$ — желювальна здатність крохмального клейстеру;

$Y_3(X_1, X_2, X_3)$ — вміст сухих речовин у надосадовій рідині крохмальної суспензії.

Результати проведеної оптимізації кислотного гідролізу картопляного крохмалю представлені на рис. 1—4.

Оптимізація за плинністю клейстеру картопляного кислотногогідролізованого крохмалю. Особливості оптимізації технологічних режимів кислотного гідролізу за плинністю клейстеру картопляного кислотногогідролізованого крохмалю представлені на рис. 1.

Узагальнене критеріальне рівняння залежності плинності клейстеру картопляного кислотногогідролізованого крохмалю від температури, тривалості обробки та концентрації кислоти має такий вигляд:

$$Y_1 = 94,4322 + 0,3199 \cdot X_1 + 0,9866 \cdot X_2 - 0,3828 \cdot X_3 + 1,2121 \cdot X_1^2 + 0,8822 \cdot X_2^2 + 1,7965 \cdot X_3^2 - 0,1956 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,0573 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1,9051 \cdot X_2 \cdot X_3.$$

Статистично значимі ефекти (рівень $p < 0,05$) мають два квадратичних члени: ТРИВАЛІСТЬ (Q) і КОНЦЕНТРАЦІЯ НСІ (Q), лінійну взаємодію змінних: ТРИВАЛІСТЬ і ТЕМПЕРАТУРА (рис. 4). Отже, квадратичні члени ТРИВАЛІСТЬ (Q) і КОНЦЕНТРАЦІЯ НСІ (Q) та лінійна взаємодія змінних ТРИВАЛІСТЬ і ТЕМПЕРАТУРА дають значні ефекти.

Мінімум плинності клейстеру картопляного кислотногогідролізованого крохмалю знаходиться в оптимумі (мінімум) 93,9 при температурі обробки 23,6°С, тривалості обробки 7,9 год та концентрації кислоти 0,315 н.

Оптимізація за желювальною здатністю клейстеру картопляного кислотногогідролізованого крохмалю. Особливості оптимізації технологічних режимів кислотного гідролізу желювальної здатності клейстеру картопляного кислотногогідролізованого крохмалю представлені на рис. 2.

Узагальнене критеріальне рівняння залежності желювальної здатності клейстеру картопляного кислотногогідролізованого крохмалю від температури, тривалості обробки та концентрації кислоти має такий вигляд:

$$Y_2 = 6,7184 + 0,6221 \cdot X_1 + 1,1181 \cdot X_2 + 0,9723 \cdot X_3 - 0,0181 \cdot X_1^2 - 0,5200 \cdot X_2^2 + 0,4528 \cdot X_3^2 - 0,1718 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,8307 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1,2468 \cdot X_2 \cdot X_3.$$

Статистично значимі ефекти (рівень $p < 0,05$) факторів у досліджуваному діапазоні відсутні, що підтверджується Картою Парето (рис. 4).

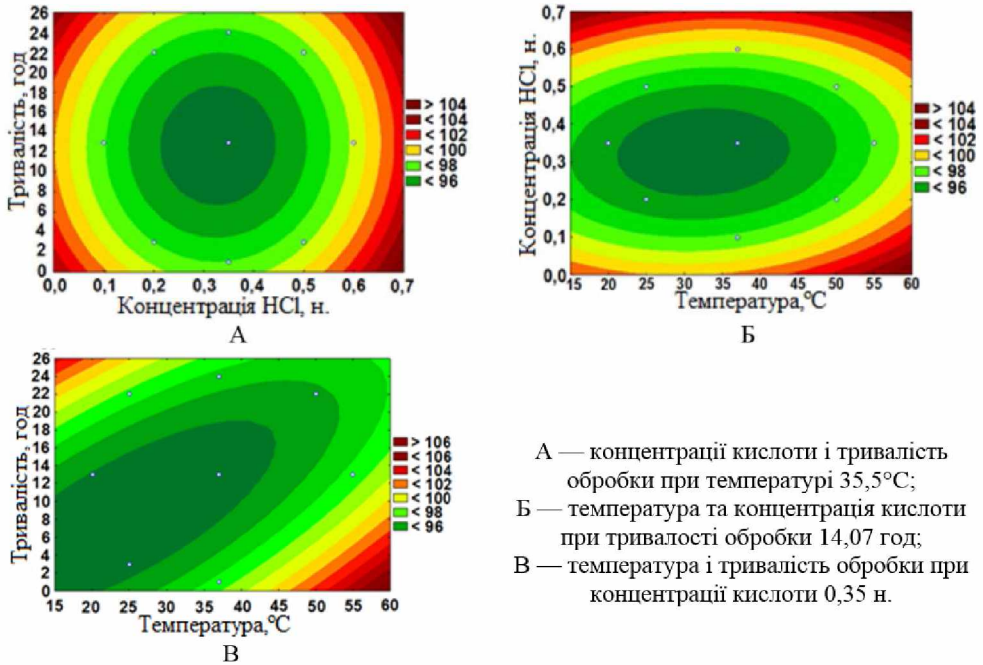


Рис. 1. Лінії рівня плинності клейстеру картопляного кислотногідролізованого крохмалю

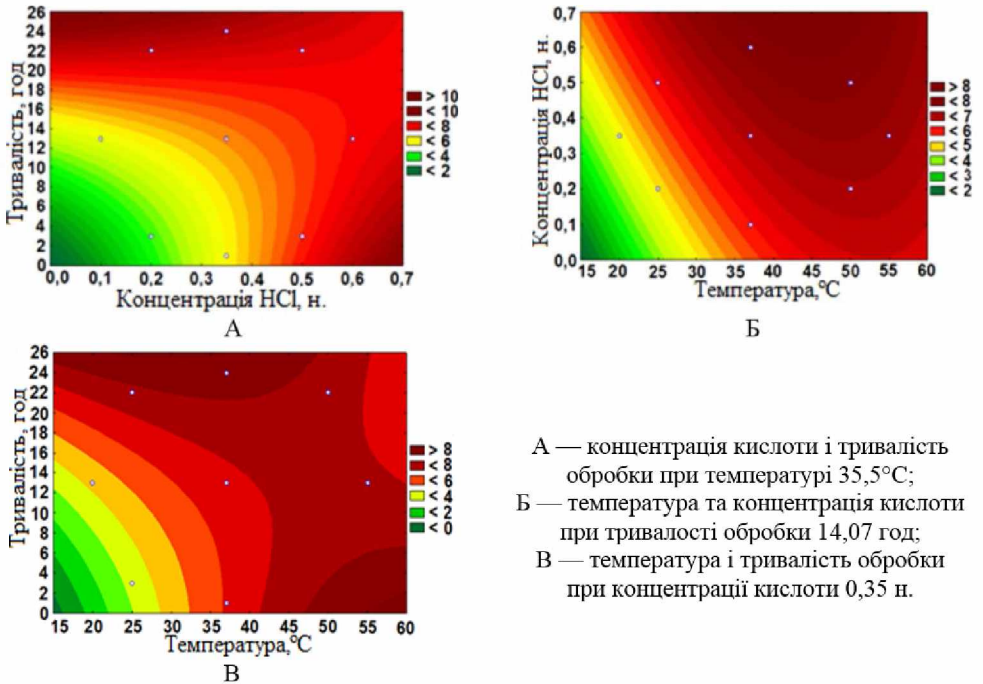


Рис. 2. Лінії рівня плинної здатності клейстеру картопляного кислотногідролізованого крохмалю

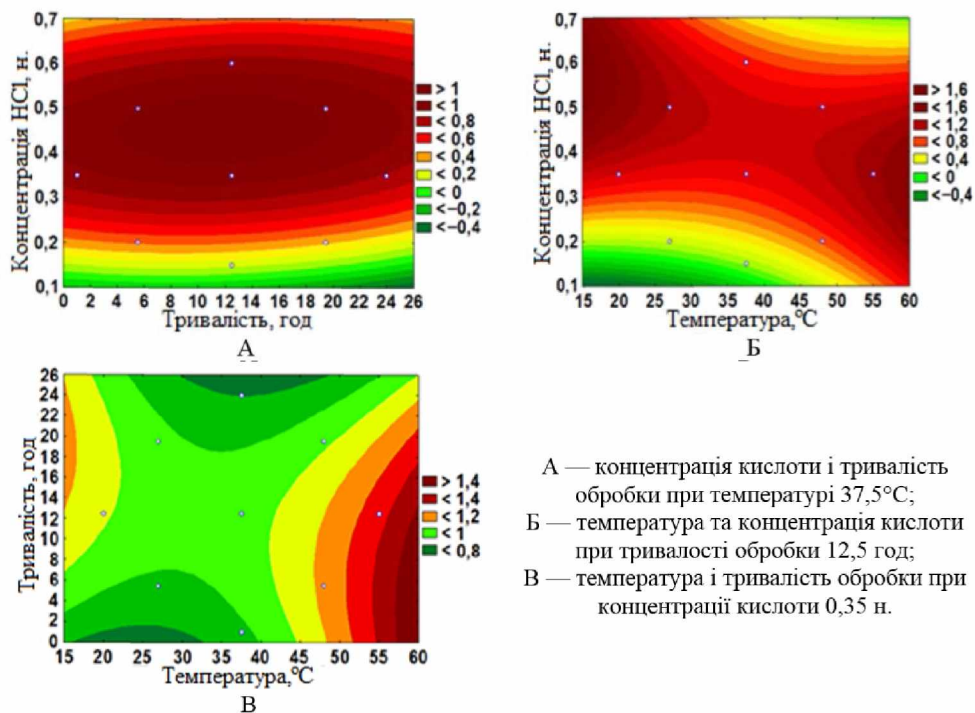


Рис. 3. Лінії рівня кількостей сухих речовин у надосадовій рідині суспензії картопляного кислотногогідролізованого крохмалю

Максимум желювальної здатності клейстеру картопляного кислотногогідролізованого крохмалю знаходиться після точки переходу 7,6 при температурі обробки 36,7°С, тривалості обробки 18,9 год і концентрації кислоти 0,65 н.

Оптимізація за кількістю сухих речовин у надосадовій рідині суспензії картопляного кислотногогідролізованого крохмалю. Особливості оптимізації технологічних режимів кислотного гідролізу за кількістю сухих речовин у надосадовій рідині суспензії картопляного кислотногогідролізованого крохмалю представлені на рис. 3.

Узагальнене критеріальне рівняння залежності вмісту сухих речовин у фільтраті картопляного кислотногогідролізованого крохмалю від температури, тривалості обробки та концентрації кислоти має такий вигляд:

$$Y_3 = 0,9510 + 0,3127 \cdot X_1 + 0,0788 \cdot X_2 - 0,0245 \cdot X_3 - 0,2257 \cdot X_1^2 + 0,0656 \cdot X_2^2 - 0,0444 \cdot X_3^2 - 0,1750 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,0250 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,0500 \cdot X_2 \cdot X_3.$$

Статистично значимі ефекти (рівень $p < 0,05$) мають лінійний член КОНЦЕНТРАЦІЯ НСІ (L), квадратичний член КОНЦЕНТРАЦІЯ НСІ (Q) та лінійну взаємодію змінних КОНЦЕНТРАЦІЯ і ТЕМПЕРАТУРА (рис. 4).

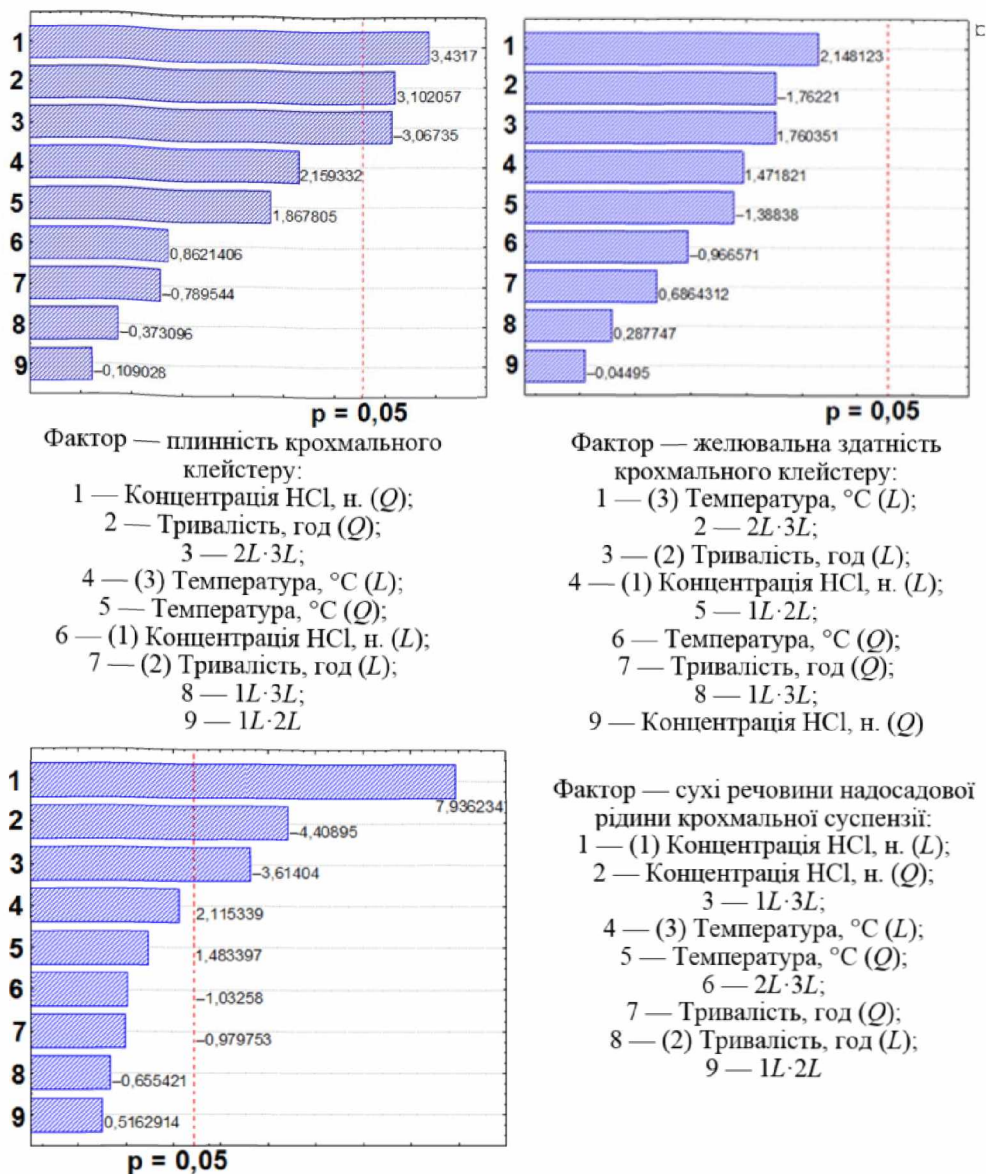


Рис. 4. Карти Парето впливу різноманітних факторів на процес крохмального гідролізу

Мінімум сухих речовин у надосадовій рідині суспензії картопляного кислотно-гідролізованого крохмалю знаходиться після точки переходу 1,05 при температурі обробки 39,1°C, тривалості обробки 11,2 год та концентрації кислоти 0,44 н.

Гідроліз крохмалю складний процес (рис. 5). Паралельно з гідролізом, що полягає в розщепленні полімерних ланцюгів крохмалю, проходить багато побічних хімічних реакцій (реакція меланоїдиноутворення, термічне руйнування глюкози, утворення фурфуролу тощо), а також здійснюється ресинтез (повторне

зшивання) полімерних ланцюгів крохмалю. При всьому різноманітті різних хімічних процесів, що відбуваються при гідролізі крохмалю, хімічну рівновагу зміщено в бік гідролітичного руйнування (1,4)- і (1,6)-глюкозидних зв'язків крохмалю.

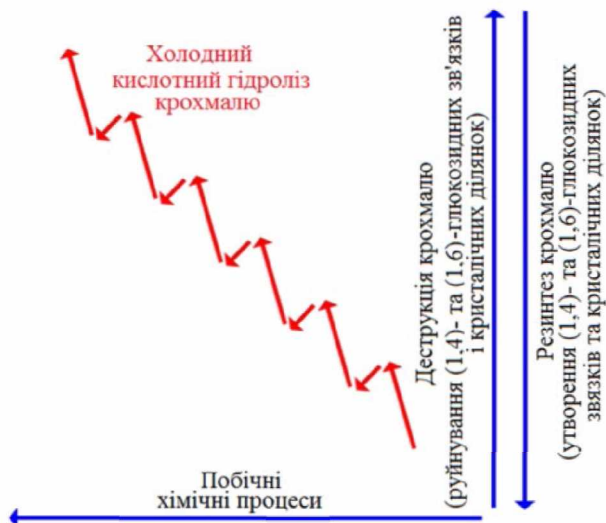


Рис. 5. Основні процеси холодного кислотного гідролізу крохмалю та їх напрямки

Висновки

Проведена оптимізація технологічних режимів кислотного гідролізу (концентрація кислоти, температура і тривалість гідролізу) картопляного крохмалю залежно від його основних фізико-хімічних властивостей (кількості сухих речовин у надосадовій рідині, плинності та желювальної здатності клейстеру).

Встановлено, що для картопляного кислотногогідролізованого крохмалю оптимум:

- мінімум плинності клейстеру картопляного кислотногогідролізованого крохмалю знаходиться в оптимумі (мінімум) 93,9 при температурі обробки 23,6°C, тривалості обробки 7,9 год та концентрації кислоти 0,315 н.;
- максимум желювальної здатності клейстеру картопляного кислотногогідролізованого крохмалю знаходиться після точки переходу 7,6 при температурі обробки 36,7°C, тривалості обробки 18,9 год і концентрації кислоти 0,65 н.;
- мінімум сухих речовин у надосадовій рідині суспензії картопляного кислотногогідролізованого крохмалю знаходиться після точки переходу 1,05 при температурі обробки 39,1°C, тривалості обробки 11,2 год та концентрації кислоти 0,44 н.

Література

1. Kaur L., Singh J. Starch: Modified Starches. Encyclopedia of Food and Health. 2016. P. 152—159.
2. Litvyak V. Size and morphological features of native starch granules of different botanical origin. *Ukrainian Food Journal*. 2018. Vol. 7. Is. 4. P. 563—576.
3. Kuk R. S., Waiga L. H., Oliveira C. S., Bet C. D., Lacerda L. G., Schnitzler E. Thermal, structural and pasting properties of brazilian ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) starch. *Ukrainian Food Journal*. 2017. V. 6. Is. 4. P. 674—685.

4. Elvers B. Ullmann's Food and Feed. Wiley-VCH, Weinheim: Verlag GmbH&Co, 2017.
5. Fan Jiang, Chunwei Du, Wenqian Jiang, Liying Wang, Shuang-kui Du. Physicochemical properties and structure of hydrothermally modified starches. *Food Hydrocolloids*. 2019. Vol. 95. P. 88—97.
6. Xiangli Kong. Chapter 7: Starches Modified by Nonconventional Techniques and Food Applications/ Starches for Food Application. 2019. P. 271—295.
7. The preparation, formation, fermentability, and applications of resistant starch / Fan Jiang, Chunwei Du, Wenqian Jiang, Liying Wang, Shuang-kui Du // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019. (In press, corrected proof, Available online 15 November 2019).
8. Maurice C. R. Franssen, Carmen G. Boeriu. Chapter 6: Chemically Modified Starch; Allyl- and Epoxy-Starch Derivatives: Their Synthesis and Characterization / Maurice C. R. Franssen, Carmen G. Boeriu // *Starch Polymers*. 2014. P. 145—184.
9. Fan Zhu. Modifications of starch by electric field based techniques. *Trends in Food Science & Technology*. 2018. Vol. 75. P. 158—169.
10. Jaime Wisniak. The History of Catalysis. From the Beginning to Nobel Prizes. *Educ. quim*. 2010. Vol. 21, No. 1. P. 60—69.
11. Ram Chavan, Kunjan Saxena, Dhananjay Tigote. Optimization of Acid Hydrolysis Process for Free Glucose Recovery From Starch IJISET — *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. 2015. Vol. 2, No. 12. P. 55—58.
12. Aborode Abdullahi Tunde. Production of Glucose from Hydrolysis of Potato Starch. *World Scientific News*. 2020. Vol. 145. P. 128—143.
13. Shujun Wang, Les Copeland. Effect of acid hydrolysis on starch structure and functionality: a review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr*. 2015. Vol. 55, No. 8. P. 1081—1097.
14. Hunter A. S., Talle E. A. Acid hydrolysis of potatoes under pressure. *American Potato Journal*. 1950. Vol. 27. P. 425—438.
15. Starch: Chemistry and Technology. 3rd Edition, Kindle Edition by James N. BeMiller (Editor), Roy L. Whistler (Editor). *Academic Press*. 2009. 894 p.
16. Raguin A., Ebenhöf O. Design starch: stochastic modeling of starch granule biogenesis. *Biochem. Soc. Trans*. 2017. Vol. 45, No. 4. P. 885—893.
17. Жушман А. И. Модифицированные крахмалы. М.: Пищепромиздат, 2007. 236 с.
18. Martins P. C., Gutkoski L. C., Martins V. G. Impact of acid hydrolysis and esterification process in rice and potato starch properties. *Int. J. Biol. Macromol*. 2018. Vol. 120. P. 959—965.
19. Dandan Li, Na Yang, Yamei Jin, Lunan Guo, Yuyi Zhou, Zhengjun Xie, Zhengyu Jin, Xueming Xu. Continuous-flow Electro-Assisted Acid Hydrolysis of Granular Potato Starch via Inductive Methodology. *Food Chem*. 2017. Vol. 229. P. 57—65.
20. Hee-Young Kim, Dong June Park, Jong-Yea Kim, Seung-Taik Lim. Preparation of Crystalline Starch Nanoparticles Using Cold Acid Hydrolysis and Ultrasonication. *Carbohydr. Polym*. 2013. Vol. 98, No. 1. P. 295—301.
21. ISO 1743:1982. Glucose syrup — Determination of dry matter content — Refractive index method. Available at: URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:1743:ed-2:v1:en>.
22. Gülden Gökşen, Hacı Ibrahim Ekiz. Pasting and gel texture properties of starch-molasses combinations. *Food Science and Technology*. 2019. V. 39. No. 1. URL: <http://dx.doi.org/10.1590/fst.27817>.
23. Штангеева Н. И., Чернявська Л. И., Рева Л. П. Методи контролю харчових виробництв: лабор. практикум: навч. посіб. Л. Київ, 2000. 240 с.
24. Черевко О. І., Крайнюк Л. М., Касілова Л. О., Димитрієвич Л. Р. Методи контролю якості харчової продукції: навч. посіб. Харків, 2005. 230 с.
25. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, Available at: URL: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook>, Date of access: June 12, 2019.
26. Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф. Планирование эксперимента. Минск: Изд-во БГУ, 1982. 302 с.
27. Ловкис З. В., Литвяк В. В., Петюшев Н. Н. Технология крахмала и крахмалопродуктов. Минск: Асобный. 2007. 178 с.