

Ирина Валерьевна Соболев

Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, заведующая кафедрой технологии хранения и переработки растениеводческой продукции, кандидат технических наук, доцент, Краснодар, Россия

E-mail: iv-sobol@mail.ru

Анастасия Васильевна Казакевич

Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, старший преподаватель кафедры высшей математики, Краснодар, Россия

E-mail: voskresenia@gmail.com

Людмила Владимировна Донченко

Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, профессор кафедры технологии хранения и переработки растениеводческой продукции, доктор технических наук, профессор, Краснодар, Россия

E-mail: niibiotechn@mail.ru

Владимир Георгиевич Григулецкий

Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, заведующий кафедрой высшей математики, доктор технических наук, профессор, Краснодар, Россия

E-mail: gvg-tnc@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Методы планирования эксперимента, используемые в научных исследованиях, помогают сократить количество проводимых лабораторных опытов и значительно ускорить достижение желаемого результата. Цель исследования – оптимизация планирования процесса обработки растительного сырья – яблочных выжимок для достижения наибольшего выхода конечного продукта – пектина. Задачи исследования: определение химического состава яблочных выжимок, содержания и фракционного состава пектиновых веществ; выбор оптимальных параметров обработки растительного сырья ферментным препаратом. В качестве объектов исследования использовались сушеные яблочные выжимки смеси сортов яблок, районированных в Краснодарском крае. При определении фракционного состава пектиновых веществ установлено высокое содержание нерастворимой фракции – протопектина, для извлечения которого в современных технологиях применяют растворы неорганических кислот. Предлагаемая технология позволит использовать более щадящие приемы воздействия на растительное сырье, не снижая эффективности технологического процесса. Расчет оптимальных условий обработки проводился на основе полученных опытных данных с использованием метода наименьших квадратов и последующего решения алгебраических линейных уравнений. В результате проведенной математической обработки получено соотношение для массовой доли пектина в зависимости от времени обработки, температуры обработки и концентрации ферментного препарата. На основе полученной математической модели процесса определены оптимальные значения времени обработки, температуры обработки и концентрации ферментного препарата. Определено максимальное значение массовой доли пектина, соответствующее экспериментальному значению с погрешностью менее 1 %. При этом выход пектиновых веществ из яблочных выжимок повышается до 85 %, что повышает эффективность и экономичность проведения процесса.

Ключевые слова: растительное сырье, планирование эксперимента, критерии оптимизации, пектиновые вещества, оптимальные условия, метод наименьших квадратов.

Irina V. Sobol

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Head of the Department of Storage Technology and Processing of Crop Products, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Krasnodar, Russia
E-mail: iv-sobol@mail.ru

Anastasia V. Kazakevich

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Senior Lecturer, Department of Higher Mathematics, Krasnodar, Russia
E-mail: voskresenia@gmail.com

Lyudmila V. Donchenko

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Professor at the Department of Storage Technology and Processing of Plant Growing Products, Doctor of Technical Sciences, Professor, Krasnodar, Russia
E-mail: niibiotechn@mail.ru

Vladimir G. Griguleckij

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Head of the Department of Higher Mathematics, Doctor of Technical Sciences, Professor, Krasnodar, Russia
E-mail: gvg-tnc@mail.ru

OPTIMIZATION OF EXPERIMENTAL PLANNING IN PROCESSING PLANT RAW MATERIALS

Experimental design methods used in research can help reduce the number of laboratory experiments performed and significantly speed up the achievement of the desired result. The purpose of this study is to optimize the planning of processing plant raw materials – apple pomace to achieve the highest yield of the final product – pectin. Research objectives are to determine the chemical composition of apple pomace, the content and fractional composition of pectin substances; selection of optimal parameters for processing plant materials with an enzyme preparation. As objects of research, we used dried apple pomace of a mixture of apple varieties, zoned in the Krasnodar Region. When determining the fractional composition of pectin substances, a high content of the insoluble fraction, protopectin, is established, for the extraction of which in modern technologies solutions of inorganic acids are used. The proposed technology will make it possible to use more gentle methods of influencing plant raw materials without reducing the efficiency of the technological process. The calculation of the optimal processing conditions was carried out on the basis of the obtained experimental data using the least squares method and the subsequent solution of algebraic linear equations. As a result of the carried out mathematical processing, a ratio was obtained for the mass fraction of pectin, depending on the processing time, processing temperature and concentration of the enzyme preparation. On the basis of the obtained mathematical model of the process, the optimal values of the processing time, processing temperature and concentration of the enzyme preparation were determined. The maximum value of the mass fraction of pectin, corresponding to the experimental value with an error of less than 1 %, was determined. At the same time, the yield of pectin substances from apple pomace increases to 85 %, which increases the efficiency and economy of the process.

Keywords: *plant raw materials, experiment planning, optimization criteria, pectin substances, optimal conditions, least squares method.*

Введение. Растительное сырье по своему химическому и биологическому составу является многокомпонентным веществом, поэтому процессы обработки и переработки растительного сырья при получении пищевых продуктов или выделении отдельных ценных компонентов являются достаточно сложными. При их прове-

дении следует учитывать множество разных факторов, влияющих друг на друга.

Для выделения ценных компонентов из растительного сырья часто необходимо интенсивное воздействие химических соединений, чтобы разрушить межмолекулярные связи и тем самым облегчить выделение конечного вещества.

Активное использование агрессивных химических веществ в разных отраслях промышленности, в том числе и в пищевой, привело к их попаданию в качестве отходов в окружающую среду, вызывая тем самым загрязнение воздуха, воды, почвы. Нитраты, пестициды, радионуклиды, токсичные металлы, содержащиеся в атмосфере, воде и почве, усваиваются растениями и по пищевой цепи передаются далее, накапливаясь в пищевых продуктах.

Увеличивается количество заболеваний, связанных с потреблением продуктов, содержащих высокое количество химических веществ – консервантов, красителей, подсластителей, стабилизаторов и т.п. Многие из подобных веществ могут вызывать аллергические реакции, действовать раздражающе на желудочно-кишечный тракт, провоцировать болезни почек, сердечно-сосудистой системы [1–3].

Правильное питание, использование в рационе веществ, адсорбирующих и нейтрализующих действие токсичных соединений, позволяют снизить негативную нагрузку на организм, улучшить метаболизм, повысить сопротивляемость организма к различным заболеваниям.

К веществам, используемым в качестве натуральных адсорбентов и детоксикантов, относятся пищевые волокна, в том числе пектиновые вещества. Пектиновые вещества вместе с целлюлозой, лигнином и гемицеллюлозами образуют каркас клеточной стенки растений. Для выделения пектиновых веществ и получения максимального результата необходимо разрушить связи между пектином, целлюлозой, гемицеллюлозами и другими соединениями.

Для этого в настоящее время применяют химически агрессивные среды – растворы минеральных кислот (соляной, серной, азотной), с последующей очисткой и сушкой полученного пектина [1, 4]. Отработанные растворы химических экстрагентов после завершения процесса должны быть очищены, нейтрализованы или утилизированы, что повышает себестоимость

продукции и может наносить вред окружающей среде.

Разработанная технология подготовки растительного сырья к процессу гидролиза предусматривает применение ферментных препаратов с целью разрушения химических связей между пектином и другими веществами клеточной стенки и повышения выхода пектина на конечной стадии.

Цель исследования. Оптимизация планирования эксперимента обработки растительного сырья при подготовке яблочных выжимок к процессу гидролиза для достижения максимального выхода конечного продукта.

Задачи исследования:

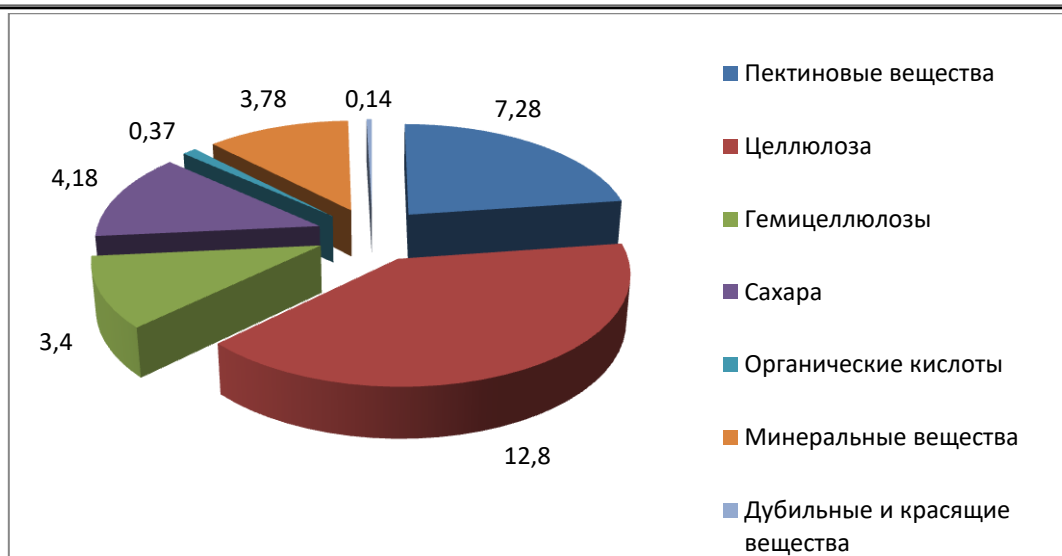
1) определить химический состав сушеных яблочных выжимок, в том числе содержание и фракционный состав пектиновых веществ;

2) подобрать оптимальные параметры обработки яблочных выжимок ферментным препаратом для получения максимального выхода конечного продукта – пектина.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования служили сушеные яблочные выжимки смеси сортов Ренет Симиренко, Ред Делишес и Айдаред (в соотношении частей 1:1:1).

Влажность яблочных выжимок определяли по ГОСТ 28561-90, содержание пектиновых веществ – кальций-пектатным методом [4], содержание сахаров – по ГОСТ 8756.13-87, органических кислот – по ГОСТ ISO 750-2013, содержание дубильных и красящих веществ, минеральных веществ (золы), целлюлозы и гемицеллюлозы определяли по общепринятым методикам [5, 6]. Математическую обработку результатов исследования проводили методом наименьших квадратов [7].

Результаты исследования и их обсуждение. Первый этап исследования заключался в изучении химического состава сушеных яблочных выжимок. Результаты исследования представлены на рисунке.



Химический состав сушеных яблочных выжимок

В результате исследования яблочных выжимок определена их влажность – 12,35 %; содержание целлюлозы – 12,8; гемицеллюлоз – 3,4; общее содержание сахаров – 4,18 (в том числе фруктозы – 5,44; глюкозы – 2,17); содержание минеральных веществ – 3,78; дубильных и красящих веществ – 0,14; общее содержание пектиновых веществ – 7,28 (в пересчете на абсолютно сухое вещество), в том числе протопектина 5,71 и растворимого пектина 1,57 %. Высокое содержание пектиновых веществ в выжимках подтверждает их высокую технологическую ценность для получения пектина.

Таким образом, нерастворимая фракция пектина *протопектин* преобладает над растворимым пектином и составляет 78,43 % от суммы пектиновых веществ. Для получения наибольшего количества пектиновых веществ необходимо перевести протопектин в растворимую форму. Гидролитическое расщепление протопектина в процессе производства катализируется ионами H^+ , однако при длительном воздействии кислоты и высокой температуры может происходить деградация молекул растворимого пектина, что влияет на молекулярную массу и далее на свойства пектиновых веществ. Для снижения этого воздействия рассматривали возможность применения ферментных препаратов, влияющих непо-

средственно на связи молекул протопектина с целлюлозой, гемицеллюлозами, лигнином [8–10].

Метод поиска оптимальных условий проведения какого-либо процесса заключается в том, что исследователь изменяет значение одного фактора, влияющего на процесс, последовательно поддерживая все остальные постоянными на различных выбранных уровнях, и опираются на максимальное значение конечного показателя. Подобная методика требует большого количества опытов.

При изучении процессов подготовки пектинового сырья к гидролизу планирование экспериментов имеет некоторые особенности, связанные в основном с выбором критерия оптимизации. Оптимизация процесса подготовки пектинового сырья по одному параметру, ввиду отсутствия однозначного универсального параметра, невозможна. Таким образом, для расчета оптимизации процесса подготовки пектинового сырья принято решение об использовании метода наименьших квадратов [7].

В качестве обобщенной математической модели процесса обработки сырья ферментными препаратами применялась следующая функциональная зависимость:

$$\begin{aligned}
 \Pi(x, y, z) = & a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + b_1x^2 + b_2y^2 + b_3z^2 + \\
 & + c_1xy + c_2xz + c_3yz \quad , \quad (1)
 \end{aligned}$$

где x , y , z – аргументы функции трех переменных; $\Pi(x,y,z)$ – функция трех аргументов (x , y , z).

В качестве основных аргументов, определяющих эффективность обработки ферментными препаратами, принимаются следующие факторы:

x – время обработки, ч;

y – температура обработки, °С;

z – концентрация фермента, %.

В качестве целевой функции $\Pi(x,y,z)$ использовался показатель – массовая доля пектина (П).

Значения постоянных a_0 , a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 , b_3 , c_1 , c_2 , c_3 в соотношении (1) определялись по экспериментальным данным, приведенным в таблице.

Опытные данные

Номер опыта, n	Π_i	x_i	y_i	z_i	Номер опыта, n	Π_i	x_i	y_i	z_i
1	0,84	0,5	30	0,5	25	1,15	0,5	30	2
2	1,16	1	30	0,5	26	1,26	1	30	2
3	1,24	2	30	0,5	27	1,32	2	30	2
4	1,22	3	30	0,5	28	1,33	3	30	2
5	1,35	0,5	40	0,5	29	1,95	0,5	40	2
6	2,01	1	40	0,5	30	2,4	1	40	2
7	2,2	2	40	0,5	31	2,5	2	40	2
8	2,28	3	40	0,5	32	2,4	3	40	2
9	0,76	0,5	50	0,5	33	0,94	0,5	50	2
10	0,8	1	50	0,5	34	1,14	1	50	2
11	0,8	2	50	0,5	35	1,1	2	50	2
12	0,78	3	50	0,5	36	1,03	3	50	2
13	1,12	0,5	30	1	37	0,9	0,5	30	3
14	1,2	1	30	1	38	1,15	1	30	3
15	1,36	2	30	1	39	1,2	2	30	3
16	1,34	3	30	1	40	1,2	3	30	3
17	2,3	0,5	40	1	41	1,1	0,5	40	3
18	2,6	1	40	1	42	1,4	1	40	3
19	2,5	2	40	1	43	1,3	2	40	3
20	2,4	3	40	1	44	1,3	3	40	3
21	0,83	0,5	50	1	45	1,2	0,5	50	3
22	0,91	1	50	1	46	1,1	1	50	3
23	0,9	2	50	1	47	1,1	2	50	3
24	0,9	3	50	1	48	0,96	3	50	3
					Σ	66,23	78	1920	78

Примечание: Π_i – выход пектина, %; x_i – время обработки, ч; y_i – температура обработки, °С; z_i – концентрация фермента, %.

Данные таблицы показывают, что зависимость массовой доли пектина (П) от времени обработки (x), или от температуры обработки (y), или от концентрации фермента (z) не является линейной: приращение (изменение) любого из трех аргументов (x , y , z) не приводит к пропорциональному изменению (приращению) функции.

Например, изменение значения x от $x_i = 0,5$ до $x_i = 1$ (при постоянных $y_i = 30$, $z_i = 0,5$) приводит к изменению функции П от значения $\Pi(0,5) = 0,84$ до значения $\Pi(1,0) = 1,6$, таким образом можно найти значения:

$$\Delta x = 1,0 - 0,5 = 0,5 \text{ и } \Delta \Pi = 1,6 - 0,84 = 0,76.$$

Далее можно найти значения:

$$\begin{aligned} \Delta x &= 2,0 - 1,0 = 1,0 \text{ и } \Delta \Pi = 1,24 - 1,16 = 0,08, \\ \Delta x &= 3,0 - 2,0 = 1,0 \text{ и } \Delta \Pi = 1,22 - 1,24 = -0,02 \end{aligned}$$

и т.д. (для других аргументов).

Из полученных значений приращений аргумента (x) и функции (Π) видно, что линейная функция трех переменных вида

$$\text{Pr}(x, y, z) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z \quad (2)$$

будет неудовлетворительно описывать опытные данные. Учитывая эти результаты, для описания опытных данных принята зависимость (1).

В соответствии с основным положением метода наименьших квадратов значения десяти постоянных $a_0, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ найдутся из условия минимума суммы квадрата отклонений экспериментальных данных $\Pi_0(x_i, y_i, z_i)$ от расчетных значений $\Pi_p(x_i, y_i, z_i)$, определяемых по формуле (1), поэтому можно записать соотношение

$$\Delta(x_i, y_i, z_i) = \sum_{i=1}^n [\Pi_0(x_i, y_i, z_i) - \Pi_p(x_i, y_i, z_i)]^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где n – число опытов (экспериментов);

Δ_i – сумма квадратов отклонений экспериментальных данных $\Pi_0(x_i, y_i, z_i)$ от расчетных значений $\Pi_p(x_i, y_i, z_i)$.

Таким образом, значения десяти неизвестных постоянных $a_0, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ находят из десяти алгебраических линейных уравнений вида:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \Delta}{\partial a_0} &= 2 \sum [\Pi_0(x_i, y_i, z_i) - \Pi_p(x_i, y_i, z_i)](1) = 0, & (4) \\ \frac{\partial \Delta}{\partial a_1} &= 2 \sum [\Pi_0(x_i, y_i, z_i) - \Pi_p(x_i, y_i, z_i)](x_i) = 0, & (5) \\ \frac{\partial \Delta}{\partial a_2} &= 2 \sum [\Pi_0(x_i, y_i, z_i) - \Pi_p(x_i, y_i, z_i)](y_i) = 0, & (6) \\ \cdot & \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \\ \frac{\partial \Delta}{\partial c_3} &= 2 \sum [\Pi_0(x_i, y_i, z_i) - \Pi_p(x_i, y_i, z_i)](y_i z_i) = 0; & (7) \end{aligned} \right.$$

(индекс суммирования (i) опущен для краткости изложения). Уравнения системы (4) – (7) в развернутой форме имеют вид:

$$a_0 n + a_1 \sum x_i + a_2 \sum y_i + a_3 \sum z_i + b_1 \sum x_i^2 + b_2 \sum y_i^2 + b_3 \sum z_i^2 + c_1 \sum x_i y_i + c_2 \sum x_i z_i + c_3 \sum y_i z_i = \sum \Pi_i, \quad (8)$$

$$a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 + a_2 \sum x_i y_i + a_3 \sum x_i z_i + b_1 \sum x_i^3 + b_2 \sum x_i y_i^2 + b_3 \sum x_i z_i^2 + c_1 \sum x_i^2 y_i + c_2 \sum x_i^2 z_i + c_3 \sum x_i y_i z_i = \sum x_i \Pi_i, \quad (9)$$

$$a_0 \sum y_i + a_1 \sum x_i y_i + a_2 \sum y_i^2 + a_3 \sum y_i z_i + b_1 \sum x_i^2 y_i + b_2 \sum y_i^3 + b_3 \sum y_i z_i^2 + c_1 \sum x_i y_i^2 + c_2 \sum x_i y_i z_i + c_3 \sum y_i^2 z_i = \sum y_i \Pi_i, \quad (10)$$

.....

$$a_0 \sum y_i z_i + a_1 \sum x_i y_i z_i + a_2 \sum y_i^2 z_i + a_3 \sum y_i z_i^2 + b_1 \sum x_i^2 y_i z_i + b_2 \sum y_i^3 z_i + b_3 \sum y_i z_i^3 + c_1 \sum x_i y_i^2 z_i + c_2 \sum x_i y_i z_i^2 + c_3 \sum y_i^2 z_i^2 = \sum y_i z_i \Pi_i. \quad (11)$$

Для решения системы десяти линейных алгебраических уравнений можно использовать любой известный метод (метод Гаусса, формулы Крамера и т.д.).

c_2, c_3 , функция трех аргументов $\Pi(x, y, z)$ соотношения (1) позволяет найти «критические» (оптимальные) значения параметров: $x_{кр}, y_{кр}, z_{кр}$ из системы трех алгебраических уравнений

После того, как определены значения постоянных коэффициентов $a_0, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1,$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial z} = 0. \quad (12)$$

или

$$\begin{cases} a_1 + 2b_1 x_{кр} + c_1 y_{кр} + c_2 z_{кр} = 0, \\ a_2 + 2b_2 y_{кр} + c_1 x_{кр} + c_3 z_{кр} = 0, \\ a_3 + 2b_3 z_{кр} + c_3 y_{кр} + c_2 x_{кр} = 0. \end{cases} \quad (13)$$

Воспользуемся данными таблицы.

На основе фактических данных рассчитаны коэффициенты-суммы для (8) – (11) и составлена система десяти линейных уравнений:

$$\begin{cases} 48a_0 + 78a_1 + 1920a_2 + 78a_3 + 171b_1 + 80000b_2 + 171b_3 + 3120c_1 + 126,75c_2 + 3120c_3 = 66,23, \\ 78a_0 + 171a_1 + 3120a_2 + 126,5a_3 + 433,5b_1 + 130000b_2 + 277,88b_3 + 6840c_1 + 277,88c_2 + 5070c_3 = 110,81, \\ 1920a_0 + 3120a_1 + 80000a_2 + 3120a_3 + 6840b_1 + 3456000b_2 + 6840b_3 + 130000c_1 + 5070c_2 + 130000c_3 = 2611,8, \\ 78a_0 + 126,5a_1 + 3120a_2 + 171a_3 + 277,88b_1 + 130000b_2 + 433,5b_3 + 5070c_1 + 277,88c_2 + 6840c_3 = 104,85, \\ 171a_0 + 433,5a_1 + 6840a_2 + 277,88a_3 + 1176,75b_1 + 285000b_2 + 609,19b_3 + 17340c_1 + 704,44c_2 + 11115c_3 = 245,08, \\ 80a_0 + 130a_1 + 3456a_2 + 130a_3 + 285b_1 + 153920b_2 + 285b_3 + 5616c_1 + 211,25c_2 + 5616c_3 = 106,4, \\ 171a_0 + 277,88a_1 + 6840a_2 + 433,5a_3 + 609,19b_1 + 285000b_2 + 1176,75b_3 + 11115c_1 + 704,44c_2 + 17340c_3 = 221,49, \\ 3120a_0 + 6840a_1 + 130000a_2 + 5070a_3 + 17340b_1 + 5616000b_2 + 11115b_3 + 285000c_1 + 11115c_2 + 211250c_3 = 4355,8, \\ 126,75a_0 + 277,88a_1 + 5070a_2 + 277,88a_3 + 704,44b_1 + 211250b_2 + 704,44b_3 + 11115c_1 + 609,19c_2 + 11115c_3 = 174,03, \\ 3120a_0 + 5070a_1 + 130000a_2 + 6840a_3 + 11115b_1 + 5616000b_2 + 17340b_3 + 211250c_1 + 11115c_2 + 285000c_3 = 4152,9. \end{cases} \quad (14)$$

Методом Гаусса определены значения постоянных:

$$\begin{aligned} a_0 &= -13,15261; a_1 = 0,7073663; a_2 = 0,7296917; a_3 = 0,5482005; \\ b_1 &= -0,102299; b_2 = -0,0092938; b_3 = -0,2322069; \\ c_1 &= -0,0053644; c_2 = -0,0375409; c_3 = 0,00666949. \end{aligned} \quad (15)$$

На основании полученных данных установлена основная математическая модель процесса обработки сырья в виде

$$\begin{aligned} \Pi(\tau, T, C) &= -13,15261 + 0,7073663\tau + 0,7296917T + \\ &+ 0,5482005C - 0,102299\tau^2 - 0,00929375T^2 - 0,2322069C^2 - \\ &- 0,00536441\tau T - 0,03754094\tau C + 0,00666949TC \end{aligned} \quad (16)$$

Для нахождения максимального значения массовой доли пектина (Π) определена система трех линейных алгебраических уравнений (13) в виде

$$\begin{cases} 0,7073663 - 0,204598x_{кр} - 0,0053644y_{кр} - 0,0375409z_{кр} = 0, \\ 0,7296917 - 0,0185875y_{кр} - 0,0053644x_{кр} + 0,00666949z_{кр} = 0, \\ 0,5482005 - 0,4644138z_{кр} + 0,00666949y_{кр} - 0,0375409x_{кр} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Решением этой системы являются значения:

$$x_{кр} = \tau = 2,14135464, y_{кр} = T = 39,2025698, z_{кр} = C = 1,57030919. \quad (18)$$

Для этих значений аргументов находим максимальное значение массовой доли пектина

$$\Pi_p(x_{кр}, y_{кр}, z_{кр}) = 2,33806811. \quad (19)$$

Выводы

1. С применением метода наименьших квадратов получено соотношение для массовой доли пектина (Π) в зависимости от времени обработки ($x = \tau$), температуры обработки ($y = T$) и концентрации ферментного препарата ($z = C$).

2. На основе полученной математической модели процесса определены оптимальные значения времени обработки ($x_{кр} = \tau = 2,14135464$), температуры обработки ($y_{кр} = T = 39,2025698$) и концентрации ферментного препарата ($z_{кр} = C = 1,57030919$), соответствующие экспериментальным данным с погрешностью менее 1%.

3. На основе математической модели процесса определено максимальное значение массовой доли пектина $\Pi_p(x_{кр}, y_{кр}, z_{кр}) = 2,33806811$, соответствующее экспериментальному значению с погрешностью менее 1%.

Литература:

1. *Донченко Л.В.* Технология пектина и пектинопродуктов. М.: ДеЛи, 2000. 256 с.
2. *Донченко Л.В., Надькта В.Д.* Безопасность пищевой продукции. М.: ДеЛи принт, 2007. 539 с.
3. Разработка технологии производства функционального напитка на основе молочной сыворотки / *Е.Н. Брюхачев, А.В. Заушинцева, Н.В. Фотина* [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2020. № 8. С. 144–152.
4. *Шелухина Н.П.* Научные основы технологии пектина. Фрунзе: Илим, 1988. 168 с.
5. Руководство по методам анализа качества и безопасности пищевых продуктов / под ред. *И.М. Скурихина, В.А.Тутельяна*. М.: Брандас, Медицина, 1998. 342 с.

6. Методы биохимического исследования растений / А.И. Ермаков [и др.]. Л.: Колос, 1972. 456 с.
7. Перегудов В.Н. Метод наименьших квадратов и его применение в исследованиях. М.: Статистика, 1965. 416 с.
8. Кислухина О.В. Ферменты в производстве пищи и кормов. М.: ДеЛи принт, 2002. 336 с.
9. Журавлева М.А., Макарова Н.В. Исследование влияния типа ферментного препарата на содержание антоцианов в клюквенном соке // Вестник КрасГАУ. 2019. № 3. С. 182–189.
10. Ферментализ сырья как фактор интенсификации процесса выделения фенольных веществ облепихового шрота / Е.Д. Рожков, Е.В. Аверьянова, М.Н. Школьникова [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2020. № 9. С. 177–184.
4. Sheluhina N.P. Nauchnye osnovy tehnologii pektina. Frunze: Ilim, 1988. 168 s.
5. Rukovodstvo po metodam analiza kachestva i bezopasnosti pischevyh produktov / pod red. I.M. Skurihina, V.A. Tutel'yana. M.: Brandas, Medicina, 1998. 342 s.
6. Metody biohimicheskogo issledovaniya rastenij / A.I. Ermakov [i dr.]. L.: Kolos, 1972. 456 s.
7. Peregudov V.N. Metod naimen'shih kvadratov i ego primeneniye v issledovaniyah. M.: Statistika, 1965. 416 s.
8. Kisluhina O.V. Fermenty v proizvodstve pischi i kormov. M.: DeLi print, 2002. 336 s.
9. Zhuravleva M.A., Makarova N.V. Issledovanie vliyaniya tipa fermentnogo preparata na sodержание antocianov v klyukvennom soke // Vestnik KrasGAU. 2019. № 3. S. 182–189.
10. Fermentoliz syr'ya kak faktor intensivifikacii processa vydeleniya fenol'nyh veschestv oblepikhovogo shrota / E.D. Rozhkov, E.V. Aver'yanova, M.N. Shkol'nikova [i dr.] // Vestnik KrasGAU. 2020. № 9. S. 177–184.

References

1. Donchenko L.V. Tehnologiya pektina i pektinoproductov. M.: DeLi, 2000. 256 s.
2. Donchenko L.V., Nadykta V.D. Bezopasnost' pischevoj produkcii. M.: DeLi print, 2007. 539 s.
3. Razrabotka tehnologii proizvodstva funkcion-al'nogo napitka na osnove molochnoj syvorot-

