

МРНТИ 65.53.29 : 65.53.03

Н.Ж. Муслимов¹ – основной автор, ©
К.К. Омаров², Г.Б. Джумабекова³,
А.Р. Туякова⁴, И.М. Заурбекова⁵



¹Д-р техн. наук, ассоц. профессор, Академик НААН РК, ²Канд. техн. наук,
^{3,4,5}Магистр

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0002-0302-2817> ²<https://orcid.org/0009-0001-0983-0153>

³<https://orcid.org/0000-0003-4639-3084> ⁴<https://orcid.org/0000-0002-0560-0844>

⁵<https://orcid.org/0009-0007-0478-522X>



^{1,2,4,5}Международный Таразский Университет им. Шерхана Муртаза,
Тараз, Казахстан



³ТОО «НПО «КазПродПром», Тараз, Казахстан



¹n.muslimov@inbox.ru

<https://doi.org/10.55956/FWNG9038>

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОДОВО-ЯГОДНЫХ ДЕСЕРТОВ ПО КРИТЕРИЮ СОХРАННОСТИ АНТИОКСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТИ

Аннотация. Плодово-ягодное сырьё служит основой функциональных продуктов питания, однако ключевым барьером является термолабильность природных антиоксидантов, необратимо разрушающихся при тепловой обработке. Поэтому актуально установление кинетических закономерностей изменения антиоксидантной активности (АОА) при различных термо-временных режимах. Цель исследования – оптимизация кинетики изменения АОА и определение оптимальных параметров тепловой обработки функциональных плодово-ягодных десертов, обеспечивающих максимальную сохранность целевых нутриентов. Работа выполнена в рамках проекта AP23483970. Экспериментально установлено: жирорастворимые антиоксиданты (AS₁) термостабильны; водорастворимые (AS₂) термолабильны, их деградация носит экспоненциальный характер. Получены адекватные полиномиальные модели второго порядка, описывающие зависимость AS₁ и AS₂ от температуры и времени обработки. Построены трёхмерные контурные диаграммы, визуализирующие кинетику трансформации антиоксидантного комплекса. Результаты позволяют прогнозировать антиоксидантные свойства десертов и рекомендовать оптимальные технологические параметры для промышленного внедрения.

Ключевые слова: плоды, ягоды, жирорастворимые антиоксиданты, водорастворимые антиоксиданты, тепловая обработка, плодово-ягодные десерты, продолжительность обработки, оптимизация, термостабильность, термолабильность.



Муслимов, Н.Ж. Оптимизация параметров тепловой обработки плодово-ягодных десертов по критерию сохранности антиоксидантной активности [Текст] / Н.Ж. Муслимов, К.К. Омаров, Г.Б. Джумабекова, А.Р. Туякова, И.М. Заурбекова // Механика и технологии / Научный журнал. – 2026. – №3(93). – С.157-184.
<https://doi.org/10.55956/FWNG9038>

Введение. Современный уровень развития техники и технологии позволяет вырабатывать натуральную пищевую продукцию на основе плодов и ягод. Именно такая продукция востребована на продовольственном рынке, как вкусная и полезная пища для рационального и правильного питания.

Однако, в результате интенсивной технологической обработки плодово-ягодного сырья, продукты приобретают низкую биологическую ценность. Осложняет ситуацию сложившаяся культура питания населения: большая доля углеводов, жиров, и как результат недостаток клетчатки и растительных волокон в ежедневном рационе питания населения [1-15].

В этой связи, ключевая технологическая задача сводится к обоснованию и подбору параметров тепловой обработки, гарантирующей максимальную сохранность нативного биохимического потенциала плодово-ягодного сырья. Решение данной проблемы позволит целенаправленно фортифицировать плодово-ягодные десерты функциональными ингредиентами - природными антиоксидантами и незаменимыми нутриентами, участвующими в купировании окислительных процессов [10-14]. Подобные исследования являются драйвером технологического развития и повышения конкурентоспособности продукции отечественных перерабатывающих предприятий.

Современные требования. Плодово-ягодные композиции в виде десертов являются перспективным направлением для создания продуктов функционального назначения. Современная парадигма рационального питания диктует необходимость повышения нутриентной плотности в продуктах питания, позиционируя их как ценный источник базовой энергии и минорных биорегуляторов. К числу контролируемых параметров относятся усвояемые формы клетчатки, поливитаминные комплексы, сбалансированный ионный состав и система эндогенных антиоксидантов, выступающих ключевыми факторами в снижении окислительной нагрузки и поддержании редокс-гомеостаза организма. Кроме того, функциональные продукты должны обеспечивать микробиологическую стабильность, длительную сохранность и высокую биологическую ценность [4].

Однако, тепловая обработка, как основной процесс производства плодово-ягодных десертов, оказывает негативное воздействие на антиоксидантный комплекс, что приводит к распаду термолабильных молекул [5]. В то же время, тепловой фактор способствует повышению экстракционной способности среды за счет нарушения целостности клеточных стенок и перехода каротиноидов в свободную форму, что требует инструментального подтверждения [16-18].

Степень изученности. Литературный обзор научно-технической информации показал, что в работах [1-17] отсутствует системный количественный анализ о характере трансформации антиоксидантного комплекса при производстве плодово-ягодных десертов, в зависимости от термодинамических параметров процесса тепловой обработки (сгущения).

Контекст исследования. Результаты представленные в настоящей статье, являются результатами научной работы, выполненной в рамках научно-технической политики Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (научный проект AP23483970) и направлена на совершенствование технологии производства плодово-ягодных десертов, обогащенные природными антиоксидантами.

Цель этапа. Обоснование оптимальных режимов тепловой обработки плодово-ягодного сырья, сохраняющие максимальное количество жирно- и водорастворимых фракций природных антиоксидантов в готовых десертах.

Материалы и методы исследования. Объектами исследования являлись районированный сорта плодовых культур и ягоды, а также десерты

на их основе, рецептурные решения которых отличаются по содержанию антиоксидантов:

- Рецепт №1 «Плодово-ягодный десерт на основе плодов персика и ягод смородины»;

- Рецепт №2 «Плодово-ягодный десерт на основе плодов яблок и ягод малины».

Экспериментальные исследования проводились в соответствии со следующими этапами [18]:

- Идентификация и валидация содержания биофлавоноидов, каротиноидов, аскорбиновой кислоты и иных соединений, выступающих в качестве маркеров антиоксидантной защиты в плодово-ягодном сырье;

- Дифференцированная оценка антиоксидантного статуса плодово-ягодного сырья с фракционированием на гидрофильную и липофильную составляющие;

- Разработка рецептов плодово-ягодных десертов на основе результатов лабораторных исследований;

- Исследование динамики изменения содержания липофильных и гидрофильных антиоксидантов в процессе термической обработки плодово-ягодных десертов.

Лабораторные исследования по изучению содержания антиоксидантов в объектах исследования проводили в соответствии с требованиями действующей нормативно-технической документации.

Определение содержания полифенолов в овощном сырье. Количественное содержание полифенолов в овощном сырье проводили в соответствии с ГОСТ Р ИСО 14502-1-2010 «Зеленый чай. Метод определения общего содержания полифенолов» (ISO 14502-1:2005 Determination of substances characteristic of green and black tea – Part 1: Content of total polyphenols in tea – Colorimetric method using Folin-Ciocalteu reagent). Сущность метода заключается в определении колориметрическим методом с применением реактива Folin-Ciocalteu. Реактив Folin-Ciocalteu содержит фосфорно-вольфрамовые кислоты, которые восстанавливаются при взаимодействии с легко окисляющимися ОН-группами фенола. При этом образуется вольфрамовая синь, обладающая характерной полосой поглощения с максимумом 765 нм, придающая исследуемому раствору синий цвет. Несмотря на то что реактив Folin-Ciocalteu по-разному взаимодействует с различными полифенолами, использование галловой кислоты в качестве стандарта позволяет достоверно определить общее содержание полифенолов. Результаты лабораторных анализов заносили в таблицы электронного формата Excel на основании которых строили сравнительные столбчатые диаграммы.

Содержание флавоноидов в овощном сырье определяли в соответствии с ГОСТ Р 55312-2012 «Прополис. Метод определения флавоноидных соединений». Сущность метода заключается в спектрофотометрическом определении оптической плотности комплексов, образующихся при взаимодействии флавоноидов, входящих в состав продуктов пчеловодства, с хлоридом алюминия. В качестве стандарта служит рутин. Определение массовой доли суммы флавоноидов в продуктах пчеловодства в пересчете на рутин следует проводить в интервале длин волн 408-420 нм. Результаты лабораторных анализов заносили в таблицы электронного формата Excel на основании которых строили сравнительные столбчатые диаграммы.

Определяли содержание пектина в отобранных пробах овощных культур. Лабораторные исследования проводили в соответствии с ГОСТ 29059-91 «Продукты переработки плодов и овощей. Титриметрический метод определения пектиновых веществ». Сущность метода заключалась в определении в них массовой доли полиуронидной части пектиновых веществ и степени ее этерификации. Титрованием щелочью предварительно выделенных и подготовленных пектиновых веществ до и после гидролиза. Результаты титрования пропорциональны числу свободных и этерифицированных карбоксильных групп и при умножении на соответствующие эквиваленты дают содержание полиуронидов в пектиновых веществах продукта.

Определение содержания витамина А в овощном сырье проводили в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54635-2011 «Продукты пищевые функциональные. Метод определения витамина А». Сущность метода заключается в разделении экстракта объекта исследования методом ВЭЖХ с последующим фотометрическим или флуориметрическим детектированием. При необходимости экстракт получают после щелочного гидролиза анализируемой пробы. Количественный анализ проводят методом внешнего стандарта с использованием площади или высоты пиков ретинола, ацетата ретинола, пальмитата ретинола. Результаты лабораторных анализов заносили в таблицы электронного формата Excel на основании которых строили сравнительные столбчатые диаграммы.

Содержание витамина Е в овощном сырье проводили в соответствии с ГОСТ Р 54634-2011 «Продукты пищевые функциональные. Метод определения витамина Е». Сущность метода заключалась в определении витамина Е в экстракте, полученном из анализируемой пробы объекта исследования, путем разделения токоферолов методом нормально-фазной или обращенно-фазной ВЭЖХ с последующим фотометрическим или флуориметрическим детектированием. Результаты лабораторных анализов заносили в таблицы электронного формата Excel на основании которых строили сравнительные столбчатые диаграммы.

Содержание витамина С в овощном сырье проводили в соответствии с ГОСТ 24556-89 «Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения витамина С». Сущность метода основан на экстрагировании витамина С раствором кислоты (соляной, метафосфорной или смесью уксусной и метафосфорной) с последующим титрованием визуальным или потенциометрическим раствором 2,6-дихлорфенолиндофенолята натрия до установления светло-розовой окраски. Результаты лабораторных анализов заносили в таблицы электронного формата Excel на основании которых строили сравнительные столбчатые диаграммы.

Определение количественного содержания β-каротина в овощном сырье проводили в соответствии с ГОСТ ИСО 6558-2-2019 «Фрукты, овощи и продукты их переработки. Определение содержания каротина спектрофотометрическим методом». Сущность метода заключалась в экстракции каротина из продукта смесью петролейного эфира и ацетона, последующем испарении растворителей, отделении каротина от других каротиноидов в полученном экстракте с применением колоночной хроматографии и спектрофотометрическим определением содержания каротина. Результаты лабораторных анализов заносили в таблицы электронного формата Excel на основании которых строили сравнительные столбчатые диаграммы.

Определение липофильных и гидрофильных антиоксидантов. Количественное содержание антиоксидантов в плодоовощном сырье и готовой продукции проводили в соответствии с ГОСТ Р 54037-2010 «Продукты пищевые. Определение содержания водорастворимых антиоксидантов амперометрическим методом в овощах, фруктах, продуктах их переработки, алкогольных и безалкогольных напитках». Сущность метода заключается в определении содержания жиро- и водорастворимых антиоксидантов амперометрическим методом в объектах исследования. Результаты исследований заносили в информационные таблицы электронного формата Excel на основании которых строили столбчатые диаграммы.

Методика эксперимента предусматривала сравнительный анализ антиоксидантной активности объектов исследования на всех этапах переработки плодово-ягодного сырья. Первичная обработка сырья включала гидроочистку и диспергирование. Далее производилось компаундирование компонентов по разработанным рецептурам, с последующей тепловой обработкой, концентрированием.

Входными контролируемыми варьируемыми факторами являлись:

- температура процесса (t , °C);
- продолжительность тепловой обработки (T , мин).

Выходными параметрами (критериями оптимизации) служили:

- содержание жирорастворимых антиоксидантов (AS_1 , мг/г);
- содержание водорастворимых антиоксидантов (AS_2 , мг/г).

Определение содержания антиоксидантов проводили как в исходном сырье, плодово-ягодной смеси и в готовой продукции до и после тепловой обработки согласно общепринятым методикам лабораторного анализа представленные выше.

Обработка результатов экспериментальных исследований. Для оптимизации большого массива экспериментальных данных применяли метод математического планирования эксперимента, который наиболее практичный и удобный для описания технологических процессов, ротатабельное планирование второго порядка [10,18].

Рассмотрим ротатабельный план второго порядка (план Бокса), позволяющее получить оптимальную совокупность входных факторов, влияющих на процесс тепловой обработки плодово-ягодных сырья, при которых критерий оптимизации принимает экстремальное значение.

При обработке результатов эксперимента и исследовании функций отклика используем уравнение второго рода вида [10]:

$$y = b_0 + \sum^n b_i x_i + \sum_{i < j}^n b_{ij} x_i x_j + \sum^n b_{jj} x_j^2 + \dots; \quad (1)$$

где: y – расчетное значение критерия оптимизации; $x_1, x_2, \dots, x_n$ – независимые переменные (факторы).

Расчет коэффициентов регрессии для ротатабельного планирования второго порядка осуществлялся по следующим формулам:

$$b_0 = a_1 \sum_1^N y_u - a_2 \sum_1^k \sum_1^N x_{iu}^2 y_u; \quad (2)$$

$$b_i = a_3 \sum_1^N x_{iu} y_u; \quad (3)$$

$$b_{ij} = a_4 \sum_1^{n_j} x_{iu} x_{ju} y_u; \quad (4)$$

$$b_{ij} = a_5 \sum_1^N x_{iu}^2 y_u + a_6 \sum_1^k \sum_1^N x_{iu}^2 y_u - a_7 \sum_1^N y_u, \quad (5)$$

где: $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$, и a_7 – коэффициенты, значения которых выбирают с учетом числа факторов.

При числе факторов $k=3$ уравнения (2)–(5) имеют такой вид

$$b_0 = 0,1663 \sum_1^{20} y_u - 0,0568 \sum_1^3 \sum_1^{10} x_{iu}^2 y_u; \quad (6)$$

$$b_i = 0,0732 \sum_1^{10} x_{iu} y_u; \quad (7)$$

$$b_{ij} = 0,125 \sum_1^8 x_{iu} x_{ju} y_u; \quad (8)$$

$$b_{ij} = 0,0625 \sum_1^{10} x_{iu}^2 y_u + 0,0069 \sum_1^3 \sum_1^{10} x_{iu}^2 y_u - 0,0568 \sum_1^{20} y_u. \quad (9)$$

Гипотезу об адекватности модели проверяем с помощью критерия Фишера:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{\{y\}}^2}, \quad (10)$$

где: S_{ad}^2 – дисперсия адекватности; $S_{\{y\}}^2$ – дисперсия воспроизводимости.

Дисперсию адекватности определим из выражения:

$$S_{ad}^2 = \frac{S_R - S_E}{f_{ad}} = \frac{\sum_1^N (\bar{y} - y_p)^2 - \sum_1^{n_0} (y_{0j} - \bar{y}_0)^2}{N - \lambda - (n_0 - 1)}, \quad (11)$$

где: $\bar{y}$ – результаты отдельных наблюдений; y_p – расчетное значение критерия по уравнению регрессии; N – число опытов, учитываемых при оценке коэффициентов регрессии; λ – число коэффициентов уравнения; n_0 – число повторений нулевого опыта.

Дисперсию воспроизводимости определим из выражения:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_1^{n_0} (y_{0j} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1}, \quad (12)$$

где: y_{0i} – результат отдельного наблюдения в нулевой точке; $\bar{y}_0$ – результат опыта в нулевой точке (среднее арифметическое); n_0 – число наблюдений в нулевой точке.

Модель адекватна, при условии $F_p < F_T$.

Для оценки значимости коэффициентов регрессии используем следующие уравнения:

$$s_{\{b_0\}}^2 = a_8 s_{\{\bar{y}\}}^2; \quad (13)$$

$$s_{\{b_i\}}^2 = a_9 s_{\{\bar{y}\}}^2; \quad (14)$$

$$s_{\{b_{ii}\}}^2 = a_{10} s_{\{\bar{y}\}}^2; \quad (15)$$

$$s_{\{b_{ij}\}}^2 = a_{11} s_{\{\bar{y}\}}^2, \quad (16)$$

где: $S_{\{b_0\}}$, $S_{\{b_i\}}$, $S_{\{b_{ii}\}}$ и $S_{\{b_{ij}\}}$ – соответственно квадратичные ошибки в определении коэффициентов b_0 , b_i , b_{ii} , b_{ij} ; $s_{\{\bar{y}\}}^2$ – ошибка среднего по параллельным наблюдениям; a_8 , a_9 , a_{10} , a_{11} – коэффициенты, значения которых выбирают с учетом числа факторов.

Обработка результатов. Обработку экспериментальных данных, расчет коэффициентов регрессии (b_0 , b_i , b_{ii} , b_{ij}), проверку адекватности моделей по критерию Фишера ($F_p < F_m$) при доверительной вероятности 90%, а также построение трехмерных поверхностей отклика выполняли с использованием программного пакета *Microsoft Excel*. Получены уравнения регрессии в кодированном и натуральном виде, описывающие зависимость содержания антиоксидантов от исследуемых факторов.

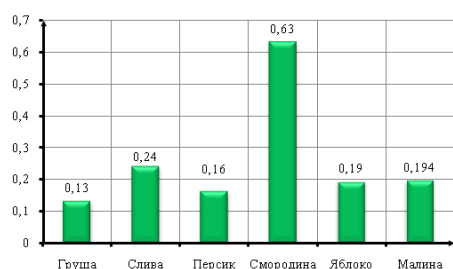
Результаты исследований. Плоды фруктов и ягод характеризуются высоким содержанием биологически активных соединений различной химической природы (водо- и жирорастворимых антиоксидантов, витаминов, полифенолов, пищевых волокон и минеральных веществ), что обуславливает их функциональную и технологическую ценность при разработке продуктов здорового питания. Совокупное действие указанных компонентов обеспечивает синергический эффект нейтрализации активных форм кислорода, ингибирование перекисного окисления липидов и поддержание редокс-гомеостаза. Выраженность антиоксидантных свойств варьирует в зависимости от ботанического вида, сорта, степени зрелости и условий культивирования [11-18].

В этой связи, изучали содержание антиоксидантов группы полифенолов в плодово-ягодном сырье. На основании результатов анализа, строили сравнительную диаграмму содержания полифенолов в отобранных пробах объектов исследования (рис. 1) [18].

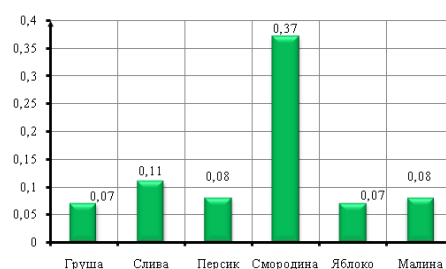
1. Наибольшее содержание полифенолов зафиксировано в смородине (0,63%), что вдвое превышает показатели других образцов. Малина (0,194%) и слива (0,24%) демонстрируют промежуточные значения, тогда как у персика (0,16%), яблока (0,19%) и груши (0,13%) данный показатель существенно ниже. Таким образом, ягоды обладают наиболее выраженной антиоксидантной емкостью.

2. Ранжирование объектов по содержанию флавоноидов выявило значительное доминирование смородины (0,37%) над всеми прочими образцами. Малина (0,08%) сопоставима с персиком (0,08%) и яблоком (0,07%), тогда как слива (0,11%) несколько превосходит их. Минимальные значения зафиксированы у груши и яблока (по 0,07%). Полученные данные подтверждают преимущество ягод по уровню флавоноидов и их антиоксидантному потенциалу.

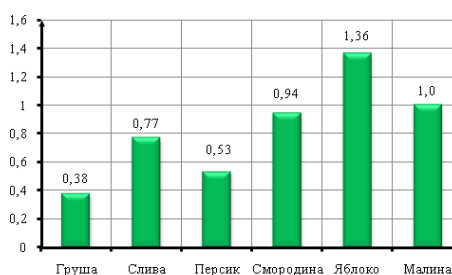
3. Наибольшее содержание пектинов зафиксировано в яблоке (1,36%), далее следуют малина (1,0%) и смородина (0,94%). Слива (0,77%) и персик (0,53%) занимают промежуточное положение, тогда как минимальный показатель отмечен у груши (0,38%). Выявленная дифференциация указывает на преимущество яблока и малины как источников пектиновых веществ, обладающих доказанным пребиотическим потенциалом.



а) полифенолы



б) флавоноиды



в) пектины

Рис.1. Содержание антиоксидантов в отобранных пробах
плодово-ягодного сырья, %

Витамины в плодах и ягодах укрепляют иммунитет, улучшают обмен веществ, способствуют нормализации работы сердечно-сосудистой системы и поддерживают здоровье кожи и слизистых оболочек. Они необходимы для правильного функционирования организма и защиты от различных заболеваний [11-18].

В этой связи, изучали витаминный состав в отобранных образцах плодов и ягод. На рисунке 2 представлена диаграмма количественного содержания витамина А в отобранных плодах и ягодах [18].

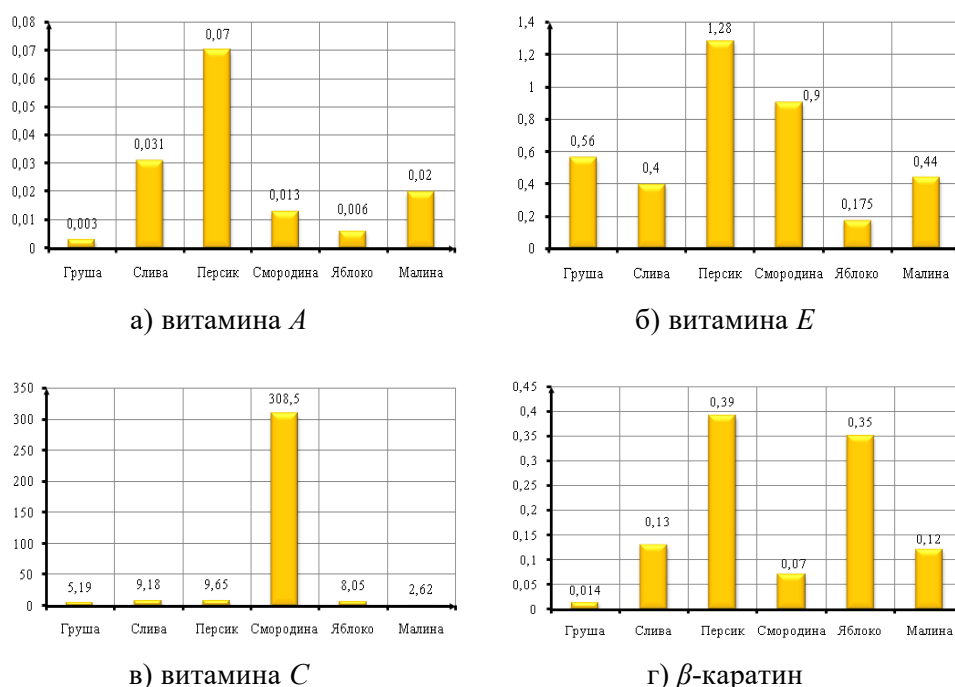


Рис.2. Массовая доля содержания витамина, мг/100 г

1. Содержание витамина А в исследованных образцах варьировало в широком диапазоне: от 0,003 мг/100 г (груша) до 0,07 мг/100 г (персик). Яблоко (0,006 мг/100 г) и смородина (0,013 мг/100 г) занимают промежуточное положение, тогда как малина (0,02 мг/100 г) демонстрирует более высокий показатель. Таким образом, персик является наиболее значимым источником витамина А среди изученных объектов.

2. Ранжирование образцов по содержанию витамина Е выявило явное преимущество персика (1,28 мг/100 г) перед смородиной (0,9 мг/100 г) и грушей (0,56 мг/100 г). Малина (0,44 мг/100 г) и слива (0,4 мг/100 г) демонстрируют близкие значения, тогда как минимальный показатель зафиксирован у яблока (0,175 мг/100 г). Полученные данные свидетельствуют о наибольшей антиоксидантной значимости персика среди изученных объектов.

3. Установлен значительный разброс содержания витамина С в исследованных плодах и ягодах - от 2,62 мг/100 г (малина) до 308,5 мг/100 г (смородина). Максимальный показатель смородины более чем в 30 раз превышает значения персика и сливы (9,65 и 9,18 мг/100 г соответственно), а также существенно превосходит показатели яблока (8,05 мг/100 г), груши (5,19 мг/100 г) и малины. Выявленное распределение обосновывает приоритетное использование смородины как высокоэффективного источника аскорбиновой кислоты для поддержания иммунной функции и репаративных процессов.

4. Установлен значительный разброс содержания β-каротина в исследованных плодах и ягодах – от 0,014 мг/100 г (груша) до 0,39 мг/100 г (персик). Максимальные показатели характерны для персика и яблока (0,35 мг/100 г), что в 2,7-3 раза превышает значения сливы (0,13 мг/100 г) и малины (0,12 мг/100 г), а также в 5-6 раз – показатели смородины (0,07 мг/100 г) и

груши. Полученные данные свидетельствуют о необходимости включения разнообразных плодов в рацион для оптимизации поступления β -каротина.

Плоды фруктов и ягод, являются ценными источниками антиоксидантов, обеспечивающие защиту организма от окислительного стресса и повреждений клеток. Эти вещества помогают снижать риск хронических заболеваний, таких как сердечно-сосудистые болезни, улучшают работу иммунной системы и способствуют замедлению процессов старения. Включение их в рацион способствует общему укреплению здоровья и поддержанию жизненного тонуса [11-18].

В этой связи, изучили комплексный содержания антиоксидантов в пищевых продуктах: водорастворимые и жирорастворимые антиоксиданты. На рисунке 3 представлена диаграмма, характеризующая содержание водорастворимых антиоксидантов в плодово-ягодном сырье [18].

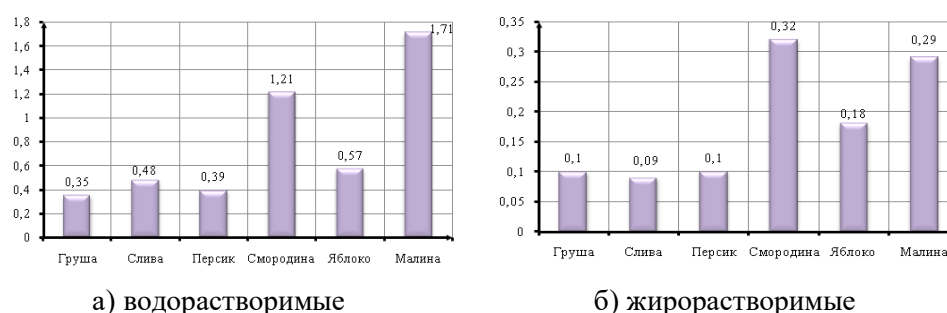


Рис.3. Содержание антиоксидантов в плодово-ягодном сырье, мг/г

1. Ранжирование объектов по содержанию водорастворимых антиоксидантов выявило преимущество ягод над фруктами. Малина (1,71 мг/г) и смородина (1,21 мг/г) демонстрируют показатели, в 2-5 раз превышающие значения яблока (0,57 мг/г), персика (0,39 мг/г) и груши (0,35 мг/г). Полученные данные обосновывают более высокую биологическую ценность ягод как источников антиоксидантов для противодействия окислительному стрессу.

2. Установлены существенные межвидовые различия в содержании жирорастворимых антиоксидантов – от 0,09 мг/г (слива) до 0,32 мг/г (смородина). Максимальные показатели характерны для смородины и малины (0,29 мг/г), что в 1,8-3,5 раза превышает значения яблока (0,18 мг/г), груши и персика (по 0,1 мг/г), а также сливы (0,09 мг/г). Выявленное распределение указывает на более высокий антиоксидантный потенциал ягод по сравнению с исследованными плодами.

На основании результатов исследования биохимической ценности объектов исследования, характеризующей его антиоксидантные свойства, разработали рецептуры плодово-ягодных десертов путем подбора оптимального процентного соотношения плодов и ягод с последующим определением содержания антиоксидантов в гидрофильной и липофильной фракциях полученных композиций. В таблицах 1-2 представлены результаты лабораторных исследований, числовые значения водорастворимых и жирорастворимых антиоксидантов в экспериментальных пробах плодово-ягодных десертах [18].

Таблица 1

Содержание антиоксидантов в плодово-ягодном десерте (Рецептура №1)

Антиоксидант	Соотношение компонентов в Плодово-ягодном десерте «Персик + смородина»						
	85% - 15%	65% - 35%	15% - 85%	25% - 75%	35% - 65%	50% - 50%	75% - 25%
Водорастворимые антиоксиданты, мг/г	0,4	0,43	0,45	0,47	0,47	0,48	0,46
Жирорастворимые антиоксиданты, мг/г	1,1	1,1	1,14	1,12	1,13	1,15	1,12

Таблица 2

Содержание антиоксидантов в плодово-ягодном десерте (Рецептура №2)

Антиоксидант	Соотношение компонентов в плодово-ягодном десерте «Яблоко + малина»						
	85% - 15%	65% - 35%	15% - 85%	25% - 75%	35% - 65%	50% - 50%	75% - 25%
Водорастворимые антиоксиданты, мг/г	0,35	0,36	0,37	0,39	0,45	0,48	0,45
Жирорастворимые антиоксиданты, мг/г	0,85	0,87	0,9	0,92	0,98	1,01	0,98

Анализ данных представленные в таблице свидетельствуют о том, что содержание гидрофильных (водорастворимых) и липофильных (жирорастворимых) антиоксидантов в плодово-ягодных десертах напрямую зависит от соотношения компонентов в рецептуре готовой продукции.

Рецептура №1 («Персик + смородина»). В исследуемых образцах десерта на основе персика и черной смородины диапазон варьирования содержания водорастворимых антиоксидантов составил от 0,40 до 0,48 мг/г. Максимальное значение данного показателя (0,48 мг/г) зафиксировано при равном соотношении компонентов (50% : 50%). Минимальное содержание (0,40 мг/г) отмечено при преобладании персика (85% : 15%).

Содержание жирорастворимых антиоксидантов варьировало в интервале 1,10-1,15 мг/г. Наибольший показатель (1,15 мг/г) наблюдался также при соотношении 50% : 50%. Наименьшие значения (1,10 мг/г) зафиксированы при соотношениях 85% : 15% и 65% : 35% соответственно. В целом, уровень липофильных антиоксидантов в данной рецептуре значительно превышает содержание гидрофильных соединений.

Рецептура №2 («Яблоко + малина»). Для десерта на основе яблока и малины (Таблица 2) характерен более широкий диапазон изменения содержания водорастворимых антиоксидантов – от 0,35 до 0,48 мг/г. Максимальное значение (0,48 мг/г) достигнуто при равном соотношении компонентов (50% яблок : 50% малины), 0,45 мг/г при соотношении 35% : 65% и 75% : 25%. Минимум (0,35 мг/г) отмечен при значительном преобладании яблока (85% : 15%).

Концентрация жирорастворимых антиоксидантов в десерте «Яблоко + малина» варьировала от 0,85 до 1,01 мг/г. Наибольшее значение (1,01 мг/г) зафиксировано при соотношении 50% : 50%. Наименьшее (0,85 мг/г) – при соотношении 85% : 15%. В отличие от Рецептуры №1, в данном случае наблюдается более низкий абсолютный уровень липофильных антиоксидантов при сопоставимых концентрациях гидрофильных соединений.

Таким образом, для обеих рецептур установлено, что максимальное содержание как водорастворимых, так и жирорастворимых антиоксидантов достигается при равном соотношении компонентов (50% : 50%). Минимальные значения, как правило, соответствуют доминированию одного из видов сырья (85% : 15%). Полученные данные свидетельствуют о синергическом эффекте смешивания плодово-ягодного сырья на антиоксидантный статус готового продукта.

Имея экспериментальные значения содержания углеводов, белков и жиров, расчетным путем определим теоретическую энергетическую ценность и калорийность плодово-ягодных десертов, которые составили [18]:

– для рецептуры №1 «Плодово-ягодный десерт на основе плодов яблок и ягод малины» (50%+50%): теоретическая энергетическая ценность 519,758 ккал, калорийность 2175,706988 Дж;

– для рецептуры №2 «Плодово-ягодный десерт на основе плодов персика и ягод смородины» (50%+50%): теоретическая энергетическая ценность 513,281 ккал, калорийность 2148,59427 Дж.

Далее изучали процесс тепловой обработки сырья при производстве плодово-ягодных десертов. На основе анализа литературных источников определены ключевые факторы, влияющие на сохранность антиоксидантов: продолжительность термической обработки (T , мин) и температура (t , °C) до которой нагревается плодово-ягодное сырьё [18].

Результаты экспериментальных исследований положены в основу оптимизации технологического процесса производства плодово-ягодных десертов в соответствии с научно-обоснованными рецептурами (№1, №2), применили ротатабельный план второго порядка (план Бокса). Основным преимуществом, которого является свойство ротатабельности обеспечивающее постоянство дисперсии прогнозируемого отклика для всех точек, находящихся на фиксированном расстоянии от центра плана. При числе факторов $K=2$ план включал более 20 опытов, в том числе 6 - в нулевой точке. В результате получены уравнения регрессии с 10 коэффициентами, адекватно описывающие исследуемые процессы.

Целью математической задачи является получение плодово-ягодных десертов с прогнозируемыми антиоксидантными свойствами, обогащенные природными нутриентами. В рамках исследования изучалась динамика изменения антиоксидантного статуса (AS) - жирорастворимой (AS_1 , мг/г) и водорастворимой (AS_2 , мг/г) фракций в результате тепловой обработки. Оптимизация режимов осуществлялась по результатам экспериментальных исследований, полученных при нагревании плодово-ягодного сырья.

С целью изучения динамики изменения концентрации липофильных (AS_1) и гидрофильных (AS_2) антиоксидантов в разработанных рецептурах плодово-ягодных десертов (№1, №2), были проведены две серии экспериментов, направленных на оценку влияния возмущающих факторов температуры (t) и времени (T) на изменения антиоксидантного статуса объектов исследования.

В рамках подготовки к экспериментальным исследованиям выполнено кодирование доверительных интервалов и уровней варьирования независимых переменных, оказывающих влияние на целевые функции y_1 и y_2 (соответствующие показателям AS_1 и AS_2). Результаты кодировки интервалов и уровней входных параметров представлены в таблице 3.

Для оптимизации процесса приготовления плодово-ягодного десерта разработаем матрицу планирования эксперимента (табл. 4).

Таблица 3

Параметры кодирования и диапазоны варьирования входных параметров

Факторы		Уровни варьирования					Интервалы варьирования
натуральные	кодированные	-1,41	-1	0	+1	+1,41	
T , мин	x_1	15	20	25	30	35	5
t , °C	x_2	80	90	100	110	120	10

Таблица 4

Матрица рототабельного планирования экспериментальных исследований по изучению процесса приготовления плодово-ягодных десертов $y_n=f(T, t)$

№	Кодированные значения		Натуральные значения		Экспериментальные значения <i>Antioxidant Status (AS)</i>	
	x_1	x_2	T , мин	t , °C	Содержание жирорастворимых антиоксидантов, AS_1 , мг/г	Содержание водорастворимых антиоксидантов, AS_2 , мг/г
Плодово-ягодный десерт «Персик + смородина» (Рецептура №1)						
1	1	1	30	110	1,1490	0,4650
2	1	-1	30	90	1,1389	0,5150
3	-1	1	20	110	1,1420	0,5200
4	-1	-1	20	90	1,1220	0,5350
5	-	-	-	-	-	-
6	1,414	0	17,93	100	1,1230	0,5400
7	1,414	0	32,07	100	1,1460	0,4700
8	0	-	-	-	-	-
9	0	1,414	25	85,86	1,0980	0,5250
10	0	1,414	25	114,14	1,1430	0,4710
11	0	0	25	100	1,1500	0,4800
Плодово-ягодный десерт «Яблоко + малина» (Рецептура №2)						
1	1	1	30	110	0,9960	0,4720
2	1	-1	30	90	1,0000	0,5120
3	-1	1	20	110	1,0000	0,5180
4	-1	-1	20	90	0,9530	0,5250
5	-	-	-	-	-	-
6	1,414	0	17,93	100	0,9850	0,5300
7	1,414	0	32,07	100	0,9960	0,4650
8	0	-	-	-	-	-
9	0	1,414	25	85,86	0,9700	0,5150
10	0	1,414	25	114,14	0,9530	0,4760
11	0	0	25	100	1,0100	0,4800

На последующем этапе производится расчет доверительных интервалов для критериев оптимизации технологического процесса производства плодово-ягодных десертов (табл. 5).

Таблица 5

Значения доверительных интервалов

№	Процесс замешивания теста	Входной параметр	Доверительные интервалы			
			Δb_0	Δb_i	Δb_{ii}	Δb_{ij}
Рецептура №1 Плодово-ягодный десерт "Персик + смородина"						
1	Жирорастворимые антиоксиданты (AS ₁ , мг/г)	y ₁	±0,00	±0,00	±0,00	±0,00
2	Водорастворимые антиоксиданты (AS ₂ , мг/г)	y ₂	±0,00	±0,00	±0,00	±0,00
Рецептура №2 Плодово-ягодный десерт "Яблоко + малина"						
3	Жирорастворимые антиоксиданты (AS ₁ , мг/г)	y ₁	±0,00	±0,00	±0,00	±0,00
4	Водорастворимые антиоксиданты (AS ₂ , мг/г)	y ₂	±0,00	±0,00	±0,00	±0,00

На основе рассчитанных доверительных интервалов были получены значения коэффициентов регрессии, сведенные в таблицу 6. Эти коэффициенты являются фундаментальной основой для интерпретации регрессионной модели, поскольку они дают количественную оценку степени влияния каждой независимой переменной на результирующий показатель. Полученные параметры служат базисом для анализа структуры взаимосвязей, построения прогнозов и верификации адекватности модели. Их использование в уравнении регрессии позволяет точно формализовать зависимости между факторами и применять полученную модель для решения прикладных задач, в частности, для оптимизации технологического процесса консервирования овощей.

Таблица 6

Коэффициенты уравнений регрессии выходных параметров
(для условия $y_n = f(T, t)$)

№	Критерий оптимизации	Коэффициенты	Рецептура №1	Рецептура №2
1	2	3	4	5
1	Водорастворимые антиоксиданты y_1 , (AS_1 , мг/г)	В кодированных значениях		
		b_0	1,1502724	1,0102358
		b_1	0,007053	0,007319
		b_2	0,011716	0,00237
		b_{12}	-0,002475	-0,01275
		b_{11}	-0,00626	-0,007916
		b_{22}	-0,013258	-0,022412
		В натуральных значениях		
		B_0	-0,6082	-2,1267
		B_1	0,01888	0,042797
		B_2	0,028924	0,051436
		B_{12}	-4,95E-05	-0,000255
		B_{11}	-0,00025	-0,000317
		B_{22}	-0,000133	-0,000224
		F_p	0	0
		$F_{таб.1}$	6,59	6,59

Продолжение таблицы 6

1	2	3	4	5
2	Жирорастворимые антиоксиданты y_2 , (AS ₂ , мг/г)	В кодированных значениях		
		b_0	0,4801212	0,48012
		b_1	-0,021748	-0,018864
		b_2	-0,01767	-0,012768
		b_{12}	-0,00875	-0,00825
		b_{11}	0,013809	0,010814
		b_{22}	0,010311	0,009814
		В натуральных значениях		
		B_0	1,7043	1,5414
		B_1	-0,014468	-0,0089
		B_2	-0,018013	-0,01678
		B_{12}	-0,000175	-0,000165
		B_{11}	0,000552	0,000433
		B_{22}	0,000103	9,81E-05
		F_p	0	0
		$F_{табл}$	6,59	6,59

На следующем этапе проводим поиск оптимальных значений функции отклика, ориентированный на достижение максимальной точности. В ходе данной оптимизации было принято решение отказаться от стандартной практики исключения статистически незначимых коэффициентов регрессии. Основная задача заключалась в поиске компромисса между повышением предсказательной способности модели и сохранением всех потенциально значимых факторов. Такой подход позволил построить более гибкую и всестороннюю модель, способную учитывать слабые эффекты влияния переменных, что в итоге обеспечит высокую точность прогнозирования.

Используя кодированные значения факторов из таблицы, были построены уравнения регрессии, описывающие процессы приготовления плодово-ягодных десертов по разработанным рецептурам. В частности, зависимость содержания жирорастворимых антиоксидантов (AS₁, мг/г) от продолжительности и температуры тепловой обработки (Эксперимент №1, $y_n=f(T, t)$) выражается следующим уравнением:

– для Рецептуры №1:

$$y_{1,1} = 1,1502724 + 0,007053 x_1 + 0,011716 x_2 - 0,002475 x_1 x_2 - 0,00626 x_1^2 - 0,013258 x_2^2; (17)$$

– для Рецептуры №2:

$$y_{2,1} = 1,0102358 + 0,007319 x_1 + 0,00237 x_2 - 0,01275 x_1 x_2 - 0,007916 x_1^2 - 0,022412 x_2^2; (18)$$

По аналогии были построены уравнения, описывающие динамику изменения содержания водорастворимых антиоксидантов (AS₂, мг/г) в зависимости от варьирования переменных факторов, продолжительности и температуры тепловой обработки ($y_n=f(T, t)$):

– для Рецептуры №1:

$$y_{1,2} = 0,4801212 - 0,021748 x_1 - 0,01767 x_2 - 0,00875 x_1 x_2 + 0,013809 x_1^2 + 0,010311 x_2^2; (19)$$

– для Рецептуры №2:

$$y_{2,2} = 0,48012 - 0,018864 x_1 - 0,012768 x_2 - 0,00825 x_1 x_2 + 0,010814 x_1^2 + 0,009814 x_2^2; (20)$$

В результате раскодирования независимых переменных в уравнениях (1-4) были получены регрессионные модели в натуральном масштабе. Переход от кодированных значений к реальным числовым характеристикам факторов позволяет непосредственно интерпретировать влияние каждой переменной на целевой критерий в условиях реального производства. Такое представление уравнений повышает их практическую ценность, делая модели пригодными для прогнозирования и анализа технологических процессов на основе фактических измерений.

Регрессионные модели, выраженные в натуральных величинах и отражающие влияние температуры и продолжительности тепловой обработки на концентрацию жирорастворимых антиоксидантов (AS_I , мг/г) примет следующий вид (Эксперимент №1, $y_n=f(T, t)$):

– для Рецептуры №1:

$$AS_{1,1} = -0,6082 + 0,01888 T + 0,028924 t - 4,95E05 T t - 0,00025 T^2 - 0,000133 t^2; (21)$$

– для Рецептуры №2:

$$AS_{2,1} = -2,1267 + 0,042797 T + 0,051436 t - 0,000255 T t - 0,000317 T^2 - 0,000224 t^2; (22)$$

Для получения уравнений регрессии, отражающих динамику изменения водорастворимых антиоксидантов в плодово-ягодных десертах от продолжительности и температуры тепловой обработки, выполним переход от кодированных значений к натуральным величинам в выражения (Эксперимент №1, $y_n=f(T, t)$):

– для Рецептуры №1:

$$AS_{4,1} = 1,7043 - 0,014468 T - 0,018013 t - 0,000175 T t + 0,000552 T^2 - 0,000103 t^2; (23)$$

– для Рецептуры №2:

$$AS_{5,1} = 1,5414 - 0,0089 T - 0,01678 t - 0,000165 T t + 0,000433 T^2 + 9,81E05 t^2; (24)$$

Оценку адекватности полученных математических моделей регрессии проводили по критерию Фишера F_p , при котором должно соблюдаться одно единственное условие $F_p < F_{табл}$ (см. предыдущую Таблицу).

Поскольку расчетное значение критерия Фишера (F_p) не превышает табличного ($F_{табл}$), полученные регрессионные модели, описывающие динамику изменения содержания жирора- и водорастворимых антиоксидантов, признаются адекватными с доверительной вероятностью 95%.

После канонического преобразования полиномов второго порядка были получены уравнения регрессии в канонической форме. Численные значения параметров оптимизации рассчитывали в среде табличного процессора Microsoft Excel (рис.№ 4), после чего на их основе строили трехмерные поверхности отклика. Данные модели представляют собой геометрическое место точек, характеризующее зависимость продолжительности и

температуры тепловой обработки на изменение содержание липофильных (AS_1) и гидрофильных (AS_2) антиоксидантов в разработанных рецептурах плодово-ягодных десертов.

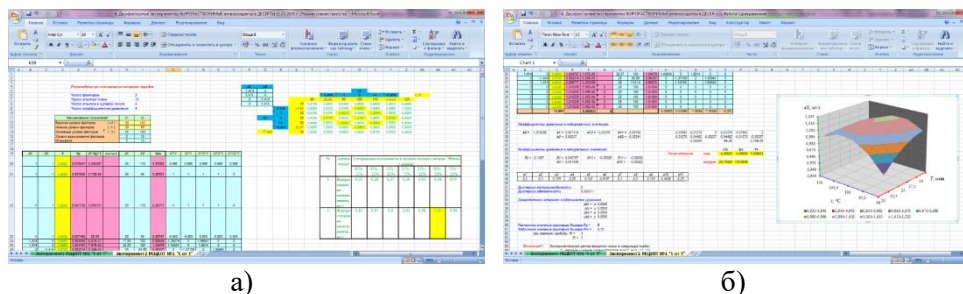


Рис. 4. Пример расчета численных значений параметров оптимизации

Обсуждение результатов исследований. На рисунке 5 представлена трехмерная поверхностная диаграмма, которая визуализирует характер изменения содержания жирорастворимых антиоксидантов в плодово-ягодном десерте «Персик + смородина» как функцию двух независимых переменных: температуры тепловой обработки (t , °C) и продолжительности обработки (T , мин).

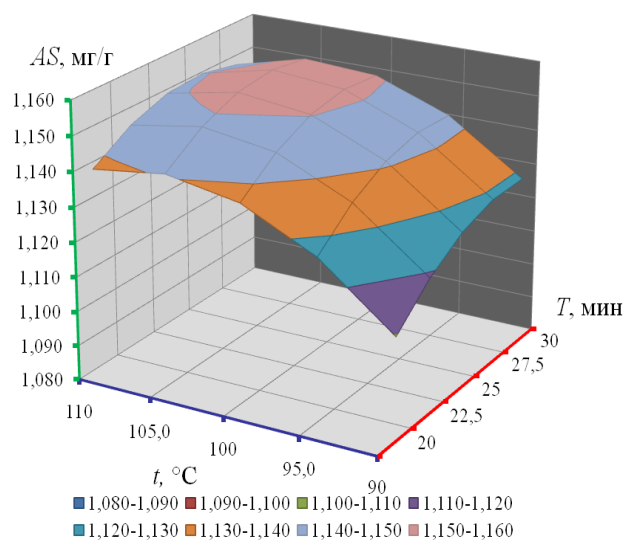


Рис. 5. Трехмерная поверхностная диаграмма динамики изменения содержания жирорастворимых антиоксидантов в плодово-ягодном десерте «Персик + смородина» (Рецептура №1), в зависимости от продолжительности и температуры тепловой обработки

Поверхность отклика демонстрирует нелинейный характер зависимости. Анализ конфигурации поверхности позволяет выделить области экстремальных значений и установить технологические параметры, обеспечивающие максимальную сохранность целевых компонентов.

В области низких температур и малой продолжительности обработки поверхность имеет пологий подъем, что соответствует переходу из зоны

минимальных значений к средним показателям. Это может быть связано с началом выделения из связанных форм жирорастворимых антиоксидантов.

Наиболее выраженный пик (глобальный максимум) поверхности, локализован в интервале температур 104,5018 °С и продолжительности 24,55501 мин. Достигнутые значения содержания антиоксидантов составляют 1,152282 мг/г.

Данный режим следует рассматривать как технологический оптимум для Рецептуры №1, позволяющий максимально сохранить жирорастворимые антиоксиданты.

При дальнейшем повышении температуры свыше 105°С и увеличении выдержки более 25 мин наблюдается крутой спад поверхности, что свидетельствует о термодеструкции жирорастворимых фракций антиоксидантов. Минимальные значения 1,147 мг/г зафиксированы в угловой области, соответствующей максимальным параметрам обработки: температура 110 °С, продолжительность обработки 30 мин.

Таким образом, диаграмма наглядно демонстрирует наличие технологического «коридора», за пределами которого тепловая обработка приводит к существенному снижению пищевой ценности готового продукта. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации режимов производства плодово-ягодного десерта (Рецептура №1).

На рисунке 6 представлена трехмерная поверхностная диаграмма, отражающая зависимость содержания жирорастворимых антиоксидантов в плодово-ягодном десерте «Яблоко + малина» (Рецептура №2) от двух технологических параметров: температуры и продолжительности тепловой обработки.

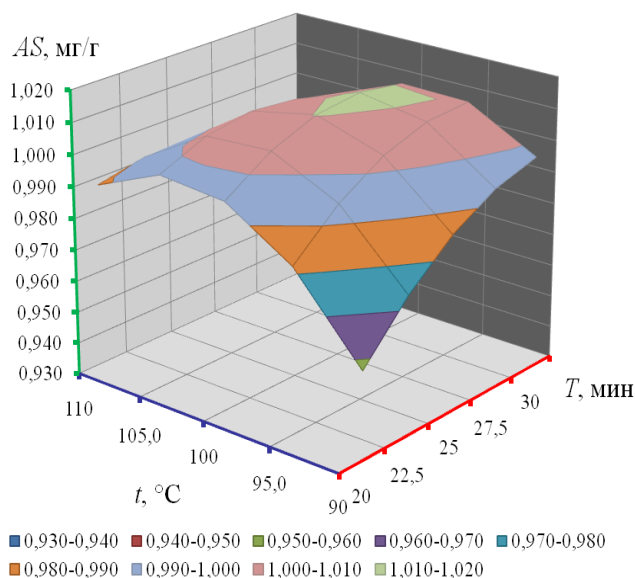


Рис. 6. Трехмерная поверхностная диаграмма динамики изменения содержания жирорастворимых антиоксидантов в плодово-ягодном десерте «Яблоко + малина» (Рецептура №2), в зависимости от продолжительности и температуры тепловой обработки

Пространственная модель демонстрирует сложный рельеф поверхности отклика, характеризующийся наличием выраженных зон максимума и минимума, что свидетельствует о существенном влиянии режимов термической обработки на сохранность биоактивных соединений в данной рецептурной композиции.

В результате проведенного анализа построенной диаграммы установлено, что в диапазоне низких и средних температур вне зависимости от продолжительности выдержки поверхность имеет относительно пологий характер с постепенным подъемом. Это указывает на стабильность антиоксидантного комплекса в условиях «щадящей» тепловой обработки.

Наиболее высокая концентрация антиоксидантов (1,009913 мг/г) фиксируется в области температуры 100,6859°C и времени обработки 24,72383 мин. Формирование данного «плато» максимальных значений может быть обусловлено синергическим эффектом компонентов яблока и малины, при котором термическое воздействие способствует более полному высвобождению жирорастворимых фракций из клеточных структур растительного сырья. Данное условие рассматриваем как технологический оптимум для Рецептуры №1, позволяющий максимально сохранить жирорастворимые антиоксиданты в плодово-ягодном десерте «Яблоко + малина».

При превышении температуры выше 105°C и времени обработки более 25 мин наблюдается резкий спад поверхности. Дегградация антиоксидантов в этой области, вероятно, связана с разрушением термолабильных соединений, входящих в состав малины, и частичной карамелизацией сахаров, блокирующих доступность анализируемых веществ.

Минимальные значения содержания антиоксидантов наблюдаем в двух случаях: в зоне минимальных температур и минимального времени тепловой обработки при котором значения содержания жирорастворимых антиоксидантов соответствует значениям 0,957мг/г; в зоне экстремальных параметров, содержание жирорастворимых антиоксидантов составило 0,977 мг/г при температуре на уровне 120 °C и продолжительность тепловой обработки 30 мин.

Таким образом, пространственная модель позволяет заключить, что для рецептуры плодово-ягодного десерта «Яблоко + малина» (Рецептура №2) характерна более широкая зона технологического оптимума по сравнению с рецептурой №1. Оптимальным режимом, обеспечивающим баланс между технологической обработкой и сохранностью полезных веществ, является интервал температур 100-101°C и продолжительность 24-25 мин. Дальнейшая интенсификация теплового воздействия экономически и биологически нецелесообразна вследствие резкого падения значений критерий оптимума - жирорастворимых антиоксидантов.

На рисунке 7 представлена трехмерная поверхностная диаграмма, характеризующая изменение содержания водорастворимых антиоксидантов в плодово-ягодном десерте «Персик + смородина» (Рецептура №1) от двух переменных: температуры и продолжительность тепловой обработки.

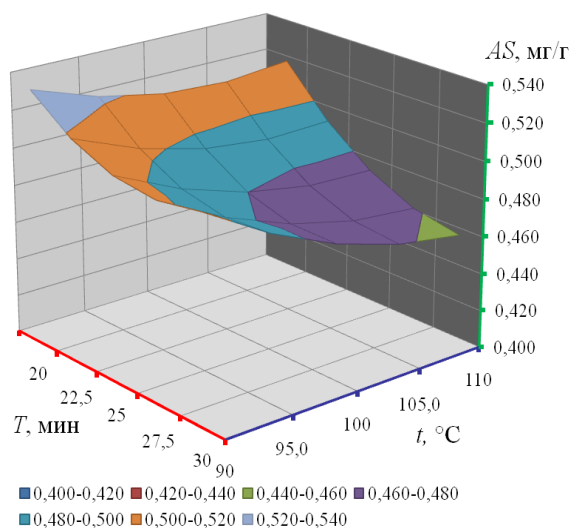


Рис.7. Трехмерная поверхностная диаграмма динамики изменения содержания водорастворимых антиоксидантов в плодово-ягодном десерте «Персик + смородина» (Рецептура №1), в зависимости от продолжительности и температуры тепловой обработки

Анализ поверхностной модели позволяет оценить термоллабильность гидрофильной фракции антиоксидантов в условиях нагревания. В области пониженных температур поверхность демонстрирует слабopоложительный градиент. Начальное снижение поверхности, а это переход из зоны с высокими значениями в область низких значений, может быть связан с увеличением коэффициента диффузии и переходом водорастворимых соединений из связанного состояния в свободный раствор под действием температуры.

Достижение глобального минимума фиксируется в диапазоне высоких температур при продолжительной тепловой обработке. Данная область характеризуется резким снижением значений содержания водорастворимых антиоксидантов, при котором достигаются минимальные значения.

Характерной особенностью данной поверхностной модели является более резкий спад (деструкция) при превышении температурного порога по сравнению с жирорастворимыми фракциями. При нагреве свыше 95 °C наблюдается крутой нисходящий склон, что свидетельствует о высокой чувствительности водорастворимых соединений (вероятно, витамина С и антоцианов смородины) к тепловому воздействию. Уже при времени обработки 26,56813 мин и температуре 109,8994 °C поверхность переходит в зону, соответствующую минимальным значениям при котором значение содержание водорастворимых антиоксидантов составляет 0,464555 мг/г. В этой связи, данные координаты необходимо рассматривать как технологический оптимум для тепловой обработки плодово-ягодного сырья для оптимального сохранения водорастворимых антиоксидантов.

Минимальная концентрация водорастворимых антиоксидантов зафиксирована в области максимальных параметров тепловой обработки, где происходит практически полная деградация лабильных гидрофильных компонентов.

Таким образом, построенная пространственная модель динамики водорастворимых антиоксидантов для Рецептуры №1 указывает на более

узкий «технологический коридор» по сравнению с липофильной фракцией. Для сохранения гидрофильных биоактивных соединений рекомендуется ограничивать температуру тепловой обработки значениями не выше 109°C, а продолжительность 26 мин. Расширение зоны нагрева ведет к экспоненциальному снижению пищевой ценности продукта по данному показателю.

На рисунке 8 представлена трехмерная поверхностная диаграмма, иллюстрирующая динамику изменения содержания водорастворимых антиоксидантов в плодово-ягодном десерте «Яблоко + малина» (Рецептура №2).

Представленная поверхностная диаграмма визуализирует совместное влияния двух технологических факторов: продолжительности (время) и температуры тепловой обработки на сохранность целевого функционального ингредиента (водорастворимых антиоксидантов) в плодово-ягодном десерте «Яблоко + малина» (Рецептура №2).

В результате проведенного анализа представленной диаграммы установлено, что зоне максимальных значений содержания антиоксидантов соответствуют минимальная продолжительность (первые 5-15 минут) и минимальная/падающей температура (60-70°C). Кратковременное нагревание при умеренных температурах не успевает вызвать значительной деградации лабильных соединений (витамин С, антоцианы, фенольные кислоты). Поверхность в этой области имеет наиболее высокие значения.

При увеличении температуры до 80-85°C (средний диапазон) наблюдается постепенное снижение содержания антиоксидантов, что визуально отражается в плавном понижении рельефа поверхностной диаграммы. Происходит ускорение реакций окисления и гидролиза термолабильных фракций антиоксидантного комплекса.

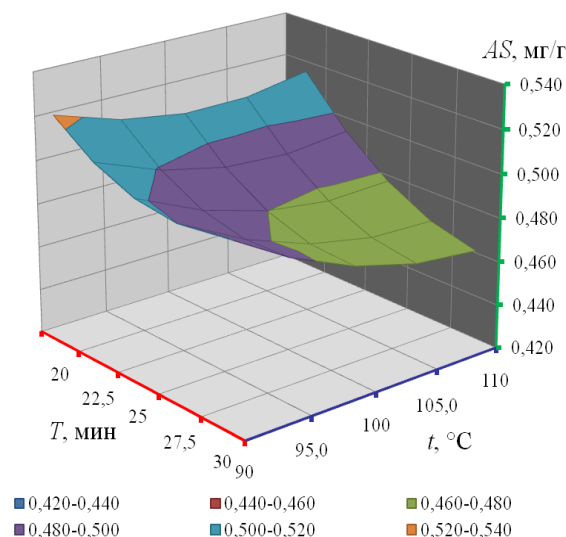


Рис. 8. Трехмерная поверхностная диаграмма динамики изменения содержания водорастворимых антиоксидантов в плодово-ягодном десерте «Яблоко + малина» (Рецептура №2), в зависимости от продолжительности и температуры тепловой обработки

После наблюдаем резкое снижение значений содержания водорастворимых антиоксидантов, при этом поверхность достигает минимальных отметок в угловой области, которая соответствует максимальной продолжительности и максимальной температуре обработки (свыше 90°C и дольше 30 минут). Здесь фиксируется самое низкие значения критерия оптимума. В результате чего, длительное воздействие высоких температур приводит к глубокой деструкции антиоксидантов.

Построенная поверхность носит ярко выраженный характер «убывающего плато». Она наглядно демонстрирует, что фактор температуры оказывает более критическое влияние на разрушение антиоксидантов, чем фактор времени (или наоборот – в зависимости от крутизны склонов, что требует уточнения по реальному графику).

Для Рецептуры №2 оптимальным технологическим режимом, обеспечивающим баланс между тепловой обработкой и максимальной сохранностью биоактивных соединений, является зона параметров на «перегибе» поверхности - до наступления фазы интенсивной деструкции, именно время тепловой обработки не должно превышать 26,47766 мин, при температуре 107,7473°C в этом случае содержание водорастворимых антиоксидантов будет на уровне 0,469599 мг/г.

Анализ трехмерных поверхностей отклика подтверждает, что искомые значения критерия оптимизации AS (y) достигаются в пределах выделенной области факторного пространства. Данный факт свидетельствует о корректном выборе интервалов варьирования независимых переменных на этапе планирования эксперимента.

На представленных графических зависимостях отчетливо идентифицируются области оптимальных сочетаний продолжительности тепловой обработки T и самой температуры обработки (t), обеспечивающие достижение оптимальных значений содержания антиоксидантов.

Полученные зависимости вида $y_n=f(T, t)$ обладают достаточной прогностической способностью в исследуемом диапазоне изменения факторов. Они позволяют не только количественно оценить характер влияния каждого из параметров на эффективность технологического процесса производства плодово-ягодных десертов, но и выявить доминирующий фактор при тепловой обработке. Это, в свою очередь, дает возможность с приемлемой точностью описать кинетику изменения содержания липофильных (AS_1) и гидрофильных (AS_2) антиоксидантов в разработанных рецептурах.

В результате выполнения экспериментальных исследований и математического моделирования процесса тепловой обработки разработанных рецептур плодово-ягодных десертов, обогащенных природными нутриентами, получены следующие основные результаты:

1. На основе ротatableного плана второго порядка построены адекватные регрессионные модели (критерий Фишера $F_p < F_{табл}$, 95% доверительная вероятность), описывающие кинетику изменения содержания жирорастворимых (AS_1) и водорастворимых (AS_2) антиоксидантов в зависимости от продолжительности (T , мин) и температуры (t , °C) тепловой обработки для двух рецептур десертов.

2. Установлены оптимальные технологические параметры, обеспечивающие максимальную сохранность липофильной фракции антиоксидантов:

– для десерта «Персик + смородина» (Рецептура №1): $T = 24,6$ мин, $t = 104,5^\circ\text{C}$, при этом содержание AS_1 достигает 1,152 мг/г;

– для десерта «Яблоко + малина» (Рецептура №2): $T = 24,7$ мин, $t = 100,7^{\circ}\text{C}$, содержание AS_1 составляет 1,010 мг/г.

3. Выявлена более высокая термолабильность водорастворимых антиоксидантов по сравнению с жирорастворимыми. Для сохранения гидрофильных соединений рекомендованы менее интенсивные режимы: температура не выше 109°C и продолжительность не более 26 мин. При превышении этих значений наблюдается экспоненциальное снижение содержания AS_2 .

4. На основе трехмерных поверхностей отклика определены «технологические коридоры» для каждой рецептуры, выход за пределы которых приводит к существенной деградации антиоксидантов вследствие термодеструкции и, в случае водорастворимых фракций, интенсивного окисления и гидролиза.

5. Разработанные регрессионные модели в натуральном масштабе позволяют с высокой точностью прогнозировать антиоксидантный статус готового продукта в исследуемом диапазоне изменения технологических факторов и могут быть использованы при масштабировании технологического процесса в промышленных условиях.

6. Таким образом, предложенное технологическое решение производства плодово-ягодных десертов с научно обоснованными режимами тепловой обработки обеспечивает высокую сохранность природных антиоксидантов, что позволяет получать продукцию с улучшенными потребительскими свойствами и повышенной биологической ценностью, отвечающую современным требованиям здорового питания.

Заключение. В результате проведенных экспериментальных исследований, в рамках реализации научного проекта AP23483970 «Совершенствование технологии производства плодово-ягодных десертов и овощных закусочных консервов, обогащенные натуральными нутриентами и природными антиоксидантами», решена прикладная задача – изучена кинетика изменения антиоксидантной активности функциональных плодово-ягодных десертов и оптимизированы режимы их тепловой обработки. Для достижения поставленной цели использованы методы экспериментального исследования и математического моделирования на основе ротатбельного плана второго порядка с применением дисперсионного анализа.

1. *Обоснование компонентного состава рецептур на основе анализа антиоксидантного статуса сырья.* В результате проведенных лабораторных исследований установлено, что среди плодово-ягодного сырья максимальными значениями по содержанию антиоксидантов, полифенолов и флавоноидов первое место соответствует ягодам смородины. А максимальное содержание пектинов, соответствует яблокам. По содержанию витаминов группы А и Е лидирует плоды персика. Максимальное содержание витамина С, несомненный лидер ягоды смородины. По содержанию β -каротина лидирует персик и яблоки. Таким образом, полученные данные положены в основу расчета рецептур плодово-ягодных десертов, которые используют комбинации "персик + малина" (рисунок 9, а, в) и «яблоки + смородина» (рис. 9, б, г).

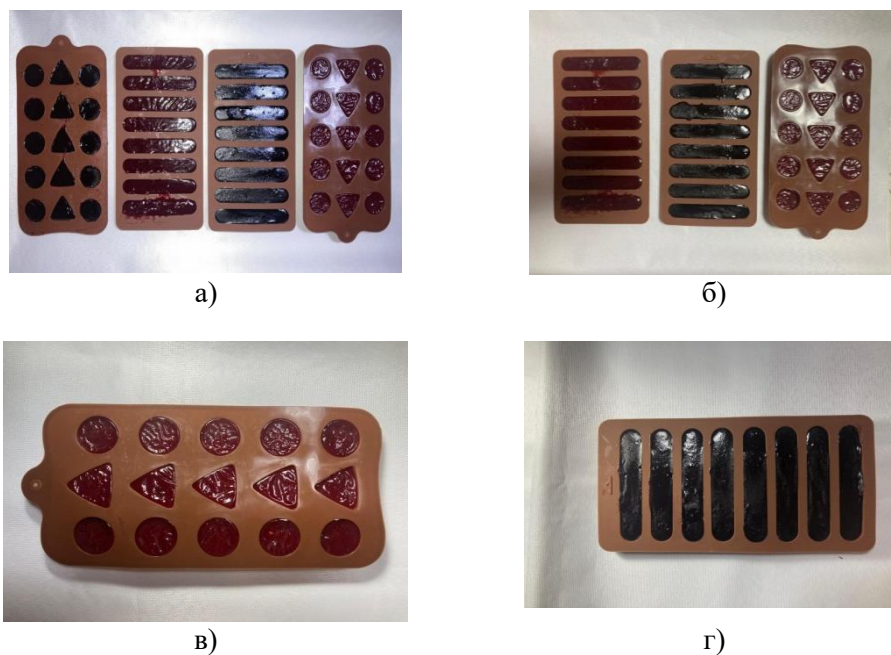


Рис. 9. Плодово-ягодные десерты

2. *Разработка рецептур и расчет энергетической ценности.* Разработали рецептуру плодово-ягодных десертов по критерию оценки: содержание водорастворимых и жирорастворимых антиоксидантов. Расчетным путем определили теоретическую энергетическую ценность и калорийность плодово-ягодных десертов:

– для рецептуры №1 «Плодово-ягодный десерт на основе плодов яблок и ягод малины» (50%+50%): теоретическая энергетическая ценность 519,758 ккал, калорийность 2175,706988 Дж;

– для рецептуры №2 «Плодово-ягодный десерт на основе плодов персика и ягод смородины» (50%+50%): теоретическая энергетическая ценность 513,281 ккал, калорийность 2148,59427 Дж.

3. *Исследование динамики антиоксидантов в процессе тепловой обработки.* Экспериментальным путем установлено, что тепловая обработка оказывает разнонаправленное влияние на антиоксидантный комплекс. Жирорастворимые антиоксиданты характеризуются большей термостабильностью и увеличивают свою концентрацию за счёт высвобождения из клеточных структур, тогда как водорастворимые соединения подвержены значительной термодеструкции. Получены адекватные регрессионные модели, позволяющие количественно описывать влияние температуры и времени на антиоксидантный статус продукта.

4. *Математическое моделирование и оптимизация режимов стерилизации.* Разработаны математические уравнения регрессии, которые наиболее точно описывают процессы тепловой обработки плодово-ягодного сырья при производстве десертов. Математические модели позволяют определить оптимальные технологические параметры тепловой обработки, обеспечивающие максимальное сохранение антиоксидантной активности: для десертов «Персик + смородина» и «Яблоко + малина» установлены индивидуальные режимы, обеспечивающие высокий уровень липофильных антиоксидантов при минимальных потерях гидрофильных соединений. Также

установлен допустимый диапазон технологических параметров («технологический коридор»), превышение которого приводит к ускоренной деградации антиоксидантов.

5. *Научная новизна и практическая значимость.* Таким образом, подтверждена возможность целенаправленного управления антиоксидантным составом функциональных десертов за счёт оптимизации параметров тепловой обработки. Полученные результаты вносят вклад в развитие научных основ создания функциональных продуктов питания с контролируемыми биологическими свойствами.

Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением биодоступности антиоксидантов в составе разработанных десертов, оценкой их функциональной эффективности в пищевых системах, а также масштабированием технологии для промышленного применения.

Практическое применение результатов заключается в использовании разработанных моделей и режимов обработки при проектировании технологий производства функциональных плодово-ягодных десертов, направленных на повышение их пищевой и биологической ценности.

Список литературы

1. Botanical Aspects of Fruit and Vegetable Crops / ed. by L.M.L. Liggins. – London : Academic Press, 2022. – 412 p.
2. Fruits, Vegetables and Herbs: Cultivation and Post-Harvest Technologies / ed. by K.W. Patil, S.K. Dutta. – New Delhi : Springer, 2020. – 538 p.
3. McDonald C.O. Postharvest Technology of Fruits and Vegetables. – New York : CRC Press, 2018. – 464 p.
4. Datta A.K., Singh K.K. Technology of Fruit and Vegetable Processing. – New Delhi : CBS Publishers, 2020. – 520 p.
5. Processing of Fruits and Vegetables: Principles and Applications / ed. by V.K. Joshi, S.K. Prasad. – New York : John Wiley & Sons, 2019. – 632 p.
6. Innovative Approaches in Food Processing Technologies / ed. by S.N. Rai, M.C. Choudhary. – Cham : Springer, 2021. – 486 p.
7. Патент № 2039458 Российская Федерация, МПК A23G 9/04. Способ производства молочного шербета : № 93026262/13 : заявл. 12.05.1993 : опубл. 20.09.1995 / заявитель Акционерное общество «Росмолоко». – 6 с.
8. Авторское свидетельство № 1414381 СССР, МПК A23G 3/00. Способ производства сахаристых кондитерских изделий, преимущественно восточных сладостей типа шербет : № 4114778/30-13 : заявл. 08.09.1986 : опубл. 07.08.1988 / Г.И. Маршалкин, С.А. Мачихин, В.Н. Красильников [и др.]. – 4 с.
9. Патент № 2457683 Российская Федерация, МПК A23G 3/48. Способ производства шербета : № 2011107210/13 : заявл. 25.02.2011 : опубл. 10.08.2012 / А.В. Кузнецов, Е.В. Смирнова. – 7 с.
10. Moldakarimov A., Iztayev A., Muslimov N. [et al.]. Determination of the optimal storage zone of functional beverages based on sprouted grain extracts using mathematical models // Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences. – 2024. – Vol. 18. – P. 1006–1027. – DOI: 10.5219/2028.
11. Kays F.A.C.R. Fruit and Vegetable Processing: Improving Quality. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2022. – 448 p.
12. Kavitha S.R., Kumar R.N. Modern Techniques in Fruit and Vegetable Processing. – New York : Nova Science Publishers, 2018. – 390 p.
13. Journal of Food Processing and Preservation. – 2021–2023. – [Electronic resource]. – Access mode: <https://onlinelibrary.wiley.com/journal/17454549>. – Date of access: 01.09.2026.

14. Masterson A.K. Fruits and Vegetables: Processing, Packaging, and Quality. – New York : CRC Press, 2021. – 356 p.
15. Recent Advances in Fruit and Vegetable Processing / ed. by C.G.R.R. Reddy, P.S. Raghavan. – Singapore : Springer, 2020. – 472 p.
16. Singhal P.R., Kaushik N.K. Food Processing Technologies: Principles and Practice. – New Delhi : New Age International, 2022. – 608 p.
17. Vegetable and Fruit Processing: Recent Trends and Innovations / ed. by M.S. Khatib, S.K. Sharma. – Cham : Springer, 2023. – 414 p.
18. Муслимов, Н.Ж. Совершенствование технологии производства плодово-ягодных десертов и овощных закусочных консервов, обогащенные натуральными нутриентами и природными антиоксидантами : отчет о научно-исследовательской работе (промежуточный) : АР23483970 [Текст] / рук. Н.Ж. Муслимов. – Тараз : МТИИ, 2025. – 98 с. – № гос. регистрации 0124РК00548; инв. № 0325РК01417.

Исследования выполнены в рамках проекта АР23483970 «Совершенствование технологии производства плодово-ягодных десертов и овощных закусочных консервов, обогащенные натуральными нутриентами и природными антиоксидантами», профинансированного Комитетом науки МНВО РК.

Материал поступил в редакцию 29.06.26, принят 20.09.26.

**Н.Ж. Мүсілімов¹, К.К. Омаров¹, Г.Б. Джумабекова²,
А.Р. Туякова¹, И.М. Заурбекова¹**

¹*Шерхан Мұртаза атындағы Халықаралық Тараз Университеті,
Тараз, Қазақстан*

²*«КазПродПром» ҒӨБ» ЖШС, Тараз, Қазақстан*

ЖЕМІС-ЖИДЕК ДЕСЕРТТЕРІН ТЕРМИЯЛЫҚ ӨНДЕУ ПАРАМЕТРЛЕРІН АНТИОКСИДАНТТЫҚ БЕЛСЕНДІЛІКТІҢ САҚТАЛУ КРИТЕРИЙІ БОЙЫНША ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Аңдатпа. Жеміс-жидек шикізаты функционалдық тамақ өнімдерінің негізі болып табылады, алайда негізгі кедергі - термиялық өңдеу кезінде қайтымсыз бұзылатын табиғи антиоксиданттардың термолабильділігі. Сондықтан әртүрлі термо-уақыттық режимдерде антиоксиданттық белсенділіктің (АОБ) өзгеруінің кинетикалық заңдылықтарын анықтау өзекті міндет болып табылады. Зерттеудің мақсаты - АОБ өзгеру кинетикасын оңтайландыру және мақсатты нутриенттердің барынша сақталуын қамтамасыз ететін функционалдық жеміс-жидек десерттерін термиялық өңдеудің оңтайлы параметрлерін анықтау. Жұмыс АР23483970 жобасы аясында орындалды. Эксперименттік түрде анықталды: майда еритін антиоксиданттар (AS_1) термотұрақты; суда еритін антиоксиданттар (AS_2) термолабильді, олардың ыдырауы экспоненциалды сипатқа ие. AS_1 және AS_2 -нің температура мен өңдеу уақытына тәуелділігін сипаттайтын екінші ретті адекватты полиномиалды модельдер алынды. Антиоксиданттық кешеннің трансформация кинетикасын көрнекілейтін үш өлшемді контурлық диаграммалар құрылды. Нәтижелер десерттердің антиоксиданттық қасиеттерін болжауға және өнеркәсіптік енгізу үшін оңтайлы технологиялық параметрлерді ұсынуға мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер. жемістер, жидектер, майда еритін антиоксиданттар, суда еритін антиоксиданттар, термиялық өңдеу, жеміс-жидек десерттері, өңдеу ұзақтығы, оңтайландыру, термотұрақтылық, термотұрақсыздық

N.Zh. Muslimov¹, K.K. Omarov¹, G.B. Dzhumabekova²,
A.R. Tuyakova¹, I.M. Zaurbekova¹

¹International Taraz University named after. Sh. Murtaza, Taraz, Kazakhstan

²“KazProdProm Research and Production Association” LLP, Taraz, Kazakhstan

OPTIMIZATION OF HEAT TREATMENT PARAMETERS FOR FRUIT AND BERRY DESSERTS BASED ON THE CRITERION OF ANTIOXIDANT ACTIVITY RETENTION

Abstract. Fruit and berry raw materials serve as the basis for functional food products; however, a key barrier is the thermolability of natural antioxidants, which undergo irreversible degradation during heat treatment. Therefore, establishing the kinetic patterns of changes in antioxidant activity (AOA) under various thermal-time regimes is of current relevance. The aim of the study is to optimize the kinetics of AOA changes and determine the optimal heat treatment parameters for functional fruit and berry desserts, ensuring maximum preservation of target nutrients. The work was carried out within the framework of project AP23483970. It was experimentally established that fat-soluble antioxidants (AS1) are thermostable, while water-soluble antioxidants (AS2) are thermolabile, and their degradation follows an exponential pattern. Adequate second-order polynomial models were obtained, describing the dependence of AS1 and AS2 on temperature and processing time. Three-dimensional contour diagrams were constructed, visualizing the kinetics of transformation of the antioxidant complex. The results allow predicting the antioxidant properties of desserts and recommending optimal technological parameters for industrial implementation.

Keywords: fruits, berries, fat-soluble antioxidants, water-soluble antioxidants, heat treatment, fruit and berry desserts, treatment duration, optimization, thermal stability, thermolability

References

1. Botanical Aspects of Fruit and Vegetable Crops / ed. by L.M.L. Liggins. – London: Academic Press, 2022. – 412 p.
2. Fruits, Vegetables and Herbs: Cultivation and Post-Harvest Technologies / ed. by K.W. Patil, S.K. Dutta. – New Delhi : Springer, 2020. – 538 p.
3. McDonald C.O. Postharvest Technology of Fruits and Vegetables. – New York : CRC Press, 2018. – 464 p.
4. Datta A.K., Singh K.K. Technology of Fruit and Vegetable Processing. – New Delhi : CBS Publishers, 2020. – 520 p.
5. Processing of Fruits and Vegetables: Principles and Applications / ed. by V.K. Joshi, S.K. Prasad. – New York : John Wiley & Sons, 2019. – 632 p.
6. Innovative Approaches in Food Processing Technologies / ed. by S.N. Rai, M.C. Choudhary. – Cham : Springer, 2021. – 486 p.
7. Patent No. 2039458 Russian Federation, IPC A23G 9/04. Sposob proizvodstva molochnogo sherbeta [Method for production of dairy sherbet]: No. 93026262/13: filed 12.05.1993: published 20.09.1995 / applicant Aktsionernoe obshchestvo «Rosmoloko». – 6 p. [in Russian].
8. Marshalkin G.I., Machikhin S.A., Krasil'nikov V.N. [et al.] Author's Certificate No. 1414381 USSR, IPC A23G 3/00. Sposob proizvodstva sakharistykh konditerskikh izdeliy, preimushchestvenno vostochnykh sladostey tipa sherbet [Method for production of sugar confectionery products, mainly oriental sweets of the sherbet type]: No. 4114778/30-13: filed 08.09.1986: published 07.08.1988. – 4 p. [in Russian].

9. Kuznetsov A.V., Smirnova E.V. Patent No. 2457683 Russian Federation, IPC A23G 3/48. Sposob proizvodstva sherbeta [Method for production of sherbet]: No. 2011107210/13: filed 25.02.2011: published 10.08.2012. – 7 p. [in Russian].
10. Moldakarimov A., Iztayev A., Muslimov N. [et al.]. Determination of the optimal storage zone of functional beverages based on sprouted grain extracts using mathematical models // Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences. – 2024. – Vol. 18. – P. 1006–1027. – DOI: 10.5219/2028.
11. Kays F.A.C.R. Fruit and Vegetable Processing: Improving Quality. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2022. – 448 p.
12. Kavitha S.R., Kumar R.N. Modern Techniques in Fruit and Vegetable Processing. – New York : Nova Science Publishers, 2018. – 390 p.
13. Journal of Food Processing and Preservation. – 2021–2023. – [Electronic resource]. – Access mode: <https://onlinelibrary.wiley.com/journal/17454549>. – Date of access: 01.09.2026.
14. Masterson A.K. Fruits and Vegetables: Processing, Packaging, and Quality. – New York : CRC Press, 2021. – 356 p.
15. Recent Advances in Fruit and Vegetable Processing / ed. by C.G.R.R. Reddy, P.S. Raghavan. – Singapore : Springer, 2020. – 472 p.
16. Singhal P.R., Kaushik N.K. Food Processing Technologies: Principles and Practice. – New Delhi : New Age International, 2022. – 608 p.
17. Vegetable and Fruit Processing: Recent Trends and Innovations / ed. by M.S. Khatib, S.K. Sharma. – Cham : Springer, 2023. – 414 p.
18. Muslimov N.Zh. Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva plodovo-yagodnykh desertov i ovoshchnykh zakusochnykh konservov, obogashchennye natural'nymi nutrientami i prirodnymi antioksidantami: otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote (promezhutochnyy): AP23483970 [Improvement of the technology for production of fruit and berry desserts and canned vegetable appetizers enriched with natural nutrients and natural antioxidants: interim research report: AP23483970] / ruk. N.Zh. Muslimov. – Taraz: MTIL, 2025. – 98 p. – State registration No. 0124RK00548; Inv. No. 0325RK01417. [in Russian].