

Многокритериальная оптимизация процесса термической обработки яблочного сока прямого отжима с максимальным антиоксидантным действием

Надежда В. Макарова, ¹	samara.pitanie@gmail.com
Динара Ф. Валиулина, ¹	dinara-bakieva@mail.ru
Владимир В. Стулин, ³	
Алексей А. Правдин ²	alex_pravdin@inbox.ru

¹ кафедра технологии и организации общественного питания, Самарский государственный технический университет, ул. Молодогвардейская 244, г. Самара, 443069, Россия

² кафедра автоматики и управления в технических системах, Самарский государственный технический университет, ул. Молодогвардейская 244, г. Самара, 443069, Россия

³ кафедра высшей математики и прикладной информатики, Самарский государственный технический университет, ул. Молодогвардейская 244, г. Самара, 443069, Россия

Реферат. Фруктовая продукция является важным источником эссенциальных пищевых веществ. В настоящее время потребители все больше осознают значение здорового питания и потребления фруктов с высокой пищевой ценностью. В связи с этим технологии переработки фруктового сырья должны быть направлены на сохранение его вкуса, цвета, аромата и пищевой ценности. Тепловая обработка является наиболее распространенным способом консервирования пищевых продуктов и осуществляется при соблюдении особых температурно-временных режимов, которые можно классифицировать по интенсивности теплового воздействия на продукт. В связи с этим предлагается изучить вопросы влияния термической обработки яблочного сока прямого отжима на свойства продукта: антирадикальную, антиокислительную активности, восстанавливающую силу. В качестве объектов исследования был взят яблочный сок прямого отжима из яблок сорта «Жигулевское», произрастающего в Самарской области. Использован метод планирования эксперимента с обработкой матрицы планирования. Установлено, что режим термической обработки сока при температуре 115–120 °С при 120 секундах является наиболее оптимальным. Построена математическая модель, описывающая влияние указанных параметров на свойства продукта. В настоящей работе предлагается специальный метод обработки баз данных в форме таблиц, который использует методы интерполяции и аппроксимации, подбирая соответствующие алгебраические многочлены, а также другие аналитические зависимости, широко применяемые в инженерно-технологической исследовательской практике. Этот метод аналитического расширения табличных данных позволяет трансформировать исходную (начальную) таблицу экспериментальных данных в сводную (конечную) таблицу данных, которая дает возможность решать определенные задачи статистического и экстремального держания. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания № 2014/ 199 ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» код 974.

Ключевые слова: яблочный сок, антиоксидантные свойства, интерполяция, аппроксимация, математическая модель

Multi-criteria optimization of heating directly squeezed apple juice with the maximum antioxidant activity

Nadezhda V. Makarova, ¹	samara.pitanie@gmail.com
Dinara F. Valiulina, ¹	dinara-bakieva@mail.ru
Vladimir V. Stulin, ³	
Aleksei A. Pravdin ²	alex_pravdin@inbox.ru

¹ catering technology and organization department, Samara state technical university, 244, Molodogvardeiskaya st., Samara, 443069, Samara, Russia

² automatics and management in technical systems department, Samara state technical university, 244, Molodogvardeiskaya st., Samara, 443069, Samara, Russia

³ advanced maths and applied information science department, Samara state technical university, 244, Molodogvardeiskaya st., Samara, 443069, Samara, Russia

Summary. Fruit production is an important source of essential nutrients. Currently, consumers are becoming increasingly aware of the importance of healthy eating and the consumption of fruit with high nutritional value. In this regard, the processing technology of fruit raw materials should be directed to the preservation of its taste, color, flavor and nutritional value. Heat treatment is the most common way of food preservation and is carried out under specific temperature-time regimes which can be categorized by intensity of a thermal effect on the product. In this connection, it is proposed to examine the questions of influence of the thermal treatment of directly squeezed apple juice on the properties of the product: antiradical, antioxidant activity, restoring force. Directly squeezed apple juice "Zhiguli" growing in Samara region was taken as the object of the study. We used experimental design method with the processing of the planning matrix. This article gives the description and study of the impact which heating directly squeezed apple juice makes on product properties: antiradical, antioxidant activities, and restoring force. It is shown that the juice heating regime at 115–120 °C at 120 seconds is the most optimum. A mathematical model describing the influence of these parameters on the properties of ice cream. In this paper we propose a special method of processing databases in the form of tables, which uses methods of interpolation and approximation, choosing the appropriate algebraic polynomials, as well as other analytical dependences are widely used in engineering and technology research practice. This method of analytic extension of tabular data allows to transform the original (primary) table of experimental data in the summary (final) data table, which enables to solve certain problems of statistical and extreme content. This study was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the basic part of the government task number 2014/199 FSBEI HPE "Samara State Technical University" code 974.

Keywords: apple juice, antioxidant properties, mathematical model, interpolation and approximation

Для цитирования

Макарова Н.В., Валиулина Д.Ф., Стулин В. В., Правдин А. А. Многокритериальная оптимизация процесса термической обработки яблочного сока прямого отжима с максимальным антиоксидантным действием // Вестник ВГУИТ. 2016. № 3. С. 44–48. doi:10.20914/2310-1202-2016-3-44-48

For citation

Makarova N. V., Valiulina D.F., Stulin V. V., Pravdin A. A. Multi-criteria optimization of heating directly squeezed apple juice with the maximum antioxidant activity. *Vestnik VSUET* [Proceedings of VSUET]. 2016. no. 3. pp. 44–48. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2016-3-44-48

Введение

Термическая обработка является одним из основных способов, позволяющих сохранять качество продуктов, полученных из фруктов и ягод. Фрукты относятся к скоропортящимся продуктам. Приблизительно от 20 до 40% фруктового сырья теряется после сбора урожая еще задолго до того, как оно достигнет потребителя, независимо от того, подверглось оно переработке или нет. Чтобы сократить потери фруктового сырья и улучшить органолептические показатели готовых пищевых продуктов на их основе, применяют различные технологии переработки. Для переработки фруктов в настоящее время используются как традиционные, так и инновационные технологии. Благодаря щадящей технологии производства яблочный сок сохраняет все полезные вещества свежих плодов и вкус "живого" сока на длительный период. Яблоко – природный источник пектинов. Кроме того, в яблоках есть почти все водорастворимые витамины, но наиболее значимые в количественном отношении – это витамины С, В6 и Р [1].

В мировой научной литературе приведено много публикаций по изменению химического состава и антиоксидантной активности фруктов под воздействием различных технологий переработки, используемых в пищевой промышленности для производства фруктовых полуфабрикатов.

Так, например, ученые из Кореи изучали влияние эффекта нагревания при 50, 100, 150 °С в течение 0–60 мин с интервалом 10 мин на содержание полифенольных соединений и антиоксидантную активность по методу DPPH, а также и восстанавливающую силу экстрактов кожуры цитрусовых фруктов Unshiu. Доказано, что при температуре 150 °С получают экстракт, имеющий наивысшее значение показателей [2].

На примере сока плодов марулла, собранных на территории Израиля и Северной Аравии в августе 2005 и в январе 2007 года, определено [3] влияние параметров пастеризации (1–60 мин при 55 °С, 2–30 мин при 63 °С, 3–30 с при 72 °С) на содержание сухих веществ, титруемую кислотность, антиоксидантную активность по методу FRAP. Если показатели сухих веществ и кислотности остаются статичными, то антиоксидантная активность пастеризованного сока по сравнению со свежим в 1-ом режиме самая высокая, во 2-ом режиме выше свежего сока, в 3-ем режиме ниже, чем у свежего сока.

В статье [4] Канадских ученых исследовался сок из лавровишен двух сортов (Kiraz, Pekmez) на наличие способности улавливать свободные радикалы DPPH, супероксид-радикалы, пероксид водорода, антиоксидантной активности по методу восстанавливающей силы.

Хотя в процессе концентрирования сок и теряет часть своей активности, однако авторы рекомендуют использовать сок из лавровишни как основу для производства продуктов лечебного питания.

На примере яблочного сока изучено [5] влияние различных режимов пастеризации: 1) 75 °С 15 с; 2) 35 °С под давлением CO₂ 15 МПа расход 3 л/ч; 3) 35 °С под давлением CO₂ 25 МПа расход 5 л/ч на показатели антиоксидантной активности на модели с кроцином, а также на микробиологическую обсемененность. Любая обработка снижает показатели антиоксидантной активности по сравнению со свежим соком, но это снижение наименьшее в случае применения режима 3.

На примерах сока ежевики изучено [6] изменение химического состава и антиоксидантной активности на различных стадиях производства сока в стерильной таре. Любая технологическая обработка снижает все показатели. Значительное уменьшение наблюдается при вторичной пастеризации, бланшировании, горячем розливе. Отходы производства сока из ежевики обладают очень высокими изученными показателями: содержанием фенолов, способностью улавливать свободные радикалы ORAC и DPPH.

Анализируя литературные источники можно сделать вывод, что в зависимости от типа исходного фруктового сырья тепловая обработка может как увеличивать, так и снижать антиоксидантную активность. Однако пока существующие данные полученных исследований не позволяют вывести какие-либо правила и зависимости по влиянию разных видов обработки на уровень антиоксидантной активности фруктов. Поэтому при разработке технологических схем производства функциональных продуктов питания с направленным антиоксидантным действием необходимо для каждого вида фруктового сырья проводить оценку изменения показателей химического состава и уровня антиоксидантной активности под влиянием различных методов обработки.

Целью данной работы является исследование влияния различных режимов пастеризации на химический состав и антиоксидантную активность сока прямого отжима из яблок сорта Жигулевское, произрастающего в Самарской области.

В качестве параметров пастеризации были выбраны следующие режимы:

- 1) температура 85–90 °С, время выдержки 180 секунд;
- 2) температура 115–120 °С, время выдержки 120 секунд;
- 3) температура 130–135 °С, время выдержки 60 секунд.

Выбор температурных и временных параметров основан на рекомендациях по режимам пастеризации соков в литературе и реальных параметрах, рекомендуемых для работы пастеризаторов в производстве продукции

консервной промышленности. Анализируя антиоксидантные показатели выбранных режимов термообработки, мы получили результаты, представленные в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Результаты исследования антиоксидантной активности яблок в зависимости от режимов термообработки

Table 1

The study results of apples antioxidant activity depending on heating conditions

Режимы Термообработки Heat Treatment Types	Показатели Rates			
	Исходный сок Source Juice	Температура Temperature 85–90 °C Время выдержки Holding Time 180 c	Температура 115–120 °C Время выдержки Holding Time 120 c	Температура 130–135 °C Время выдержки Holding Time 60 c
Общее содержание фенолов, мг галловой кислоты / 100 г. исходного сырья Total amount of phenols, mg of gallic acid / 100 g of raw material	230	160	317	178
Общее содержание флавоноидов, мг катехина / 100 г. исходного сырья Total amount of flavonoids, mg of catechine / 100 g of raw material	48	42	146	102
FRAP, ммоль Fe ²⁺ /1 кг исходного сырья FRAP value mmol Fe ²⁺ /1 kg of raw material	5,04	1,62	5,23	4,50
E _{c50} , мг/см ³ E _{c50} , mg/cm ³	52	139	25	99
Антиоксидантная активность в системе линолевая кислота, % ингибирования окисления линолевой кислоты Antioxidant activity in linolic acid system, % of inhibition of oxidation of linolic acid	28,8	5,1	17,0	21,1

В таблице 1 представлены данные изменения антиоксидантной активности в зависимости от различных параметров термообработки. Для оптимизации выбора режима пастеризации на основании полученных экспериментальных данных была проведена математическая обработка материалов.

Представление зависимостей в виде таблиц, содержащих экспериментальные данные для факторов X_i и выходных параметров y_i , не обладает наглядностью, не позволяет определить значения при значениях факторов, отличных от зарегистрированных, неудобно для последующих исследований, особенно с применением компьютерных программ расчёта. В подобных ситуациях всегда возникает задача о построении аналитического выражения (математической модели), которое в том или ином смысле хорошо описывало бы данные, представило бы информацию в «сжатом» виде.

С учётом изложенного в настоящей работе предлагается специальный метод обработки баз данных в форме таблиц, который использует методы интерполяции и аппроксимации, подбирая

соответствующие алгебраические многочлены, а также другие аналитические зависимости, широко используемые в инженерно-технологической исследовательской практике. Этот метод аналитического расширения табличных данных (сокращённо АРТД) позволяет трансформировать исходную (начальную) таблицу экспериментальных данных (НТЭД) в сводную (конечную) таблицу данных (СТД), которая даёт возможность решать определённые задачи статистического и экстремального содержания.

В качестве наиболее важных факторов были выбраны значения антиоксидантных свойств яблочного сока, представленные в таблице 1.

Таблица 1 методом полигональной интерполяции со столбцами факторов X_i ($i = 1, 2, 3, 4$) и выходного параметра y_1 трансформирована в сводную таблицу 2. Введены следующие обозначения: фактор x_1 – температура термообработки (°C); фактор x_2 – время выдержки в секундах (с); фактор x_3 – общее содержание флавоноидов (мг катехина / 100 г. сырья); фактор x_4 – E_{c50}, (мг/см³); выходной параметр y_1 – антиоксидантная активность в системе

линолевая кислота (% ингибирования окисления линолевой кислоты). Базовые экспериментальные данные в таблице 2 представлены строками 1, 4, 9, 12, остальные имеют смысл численных экспериментов, а остальные четыре уравнения системы

представляют собой необходимые условия экстремума функции четырех переменных $y_i = f_i(x_1x_2x_3x_4)$, которые автоматически реализуются при решении системы.

Т а б л и ц а 2

Сводная таблица данных при исследовании влияния термической обработки на свойства яблочного сока

T a b l e 2

Summary table of data in the study of the heating effect on the properties of apple juice

№ эксперимента № of experiment	Факторы Factors				Параметры Parameters
	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1
1	20,1	0	48	52	28,8
2	48,05556	101,4815	17,85185	127,3461	14,265
3	70,27778	158,5185	19,03704	151,5438	6,900694
4	87,5	180	42	139	5,1
5	95,78	179,52	62,256	119,8327	6,020102
6	102,74	171,36	84,848	95,73675	8,017646
7	108,56	157,44	107,712	69,82481	10,74479
8	113,42	139,68	128,784	45,20886	13,85434
9	117,5	120	146	25	17
10	123,0556	88,14815	160,5185	9,568889	21,37556
11	127,7778	65,18519	149,037	29,43316	23,27795
12	132,5	60	102	99	21,1
13	0	180	42	139	0
14	87,5	0	42	139	0
15	87,5	180	0	139	0
16	87,5	180	42	0	0

Для математической обработки данных сводной таблицы 2 воспользуемся планом 2^k . Применительно к нашей сводной таблице 2, состоящей из 16 строк, наиболее подходит план $2^4 = 16$, который позволяет определить 16 коэффициентов в уравнении регрессии:

$$y_1 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + b_{234}x_2x_3x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4 \quad (1)$$

Окончательная реализация всего вычислительного алгоритма позволила получить параболическую аппроксимационную модель четвертого порядка:

$$y_1 = -1002375,627 + 7804,12763x_1 + 10393,0145x_2 + 18164,85905x_3 + 5906,734576x_4 - 106,9207263x_1x_2 - 134,8600472x_1x_3 - 54,76973129x_1x_4 - 65,01513939x_2x_3 - 60,65248461x_2x_4 - 70,77717745x_3x_4 + 0,53965145x_1x_2x_3 + 0,683066942x_1x_2x_4 + 0,607848215x_1x_3x_4 - 0,028629753x_2x_3x_4 + 2,83016E-14x_1x_2x_3x_4 \quad (2)$$

Модель адекватна, отклонения по всем расчётным точкам сводной таблицы меньше 1%. В качестве оптимальной точки исследования

многофакторного пространства по данным таблицы 1 выбрана точка с минимальным значением $y_1 = 5,1$, т. е. точка $P_1(87,5; 180; 42; 139)$. Исследование изменения функции Δ_2 в окрестности этой точки с помощью варьирования приращений $h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{14}$ независимых переменных x_1, x_2, x_3, x_4 выявило, что значения функции совпадают при симметричных по знаку значениях приращений h_{ij} и это даёт основание утверждать – в исследуемом гиперпространстве 4-х факторов данные сводной таблицы 2 представляют гиперповерхность типа гиперболический параболоид.

Заключение

Таким образом, на основании проведённых исследований по изучению антиоксидантных свойств яблочного сока прямого отжима и математической оптимизации полученной модели был рекомендован оптимальный температурный режим пастеризации температура нагревания 115–120 °С, время выдержки – 120 секунд, поскольку при этом обеспечиваются самые благоприятные показатели комплекса антиоксидантных свойств продукта.

ЛИТЕРАТУРА

1 Синха Н.К., Хью И.Г. Настольная книга производителя и переработчика плодовоовощной продукции. СПб.: Профессия, 2013. 896 с.

2 Imahori Y., Bai J., Baldwin E. Antioxidative responses of ripe tomato fruit to postharvest chilling and heating treatments // *Scientia Horticulturae*. 2016. V. 198. № 1. P. 398–406.

3 Wang J., You Y., Chen W., Xu Q. et al. Optimal hypobaric treatment delays ripening of honey peach fruit via increasing endogenous energy status and enhancing antioxidant defence systems during storage // *Postharvest Biology and Technology*. 2015. V. 101. P. 1–9.

4 Brochier B., Mercali G.D., Marczak L.D.F. Influence of moderate electric field on inactivation kinetics of peroxidase and polyphenol oxidase and on phenolic compounds of sugarcane juice treated by ohmic heating // *LWT – Food Science and Technology*. 2016. V. 74. P. 396–403.

5 Zielinska M., Michalska A. Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture // *Food Chem.* 2016. V. 212. № 1. P. 671–680.

6 Wojdylo A., Figiel A., Legua P., Lech K. et al. Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried jujube fruits as affected by cultivar and drying method. // *Food Chem.* 2016. V. 207. № 5. P. 170–179.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Надежда В. Макарова д.х.н., зав. кафедрой, кафедра технологии и организации общественного питания, Самарский государственный технический университет ул. Молодогвардейская 244, г. Самара, Россия, samara.pitanie@gmail.com

Динара Ф. Валиуллина к.т.н., старший преподаватель, кафедра технологии и организации общественного питания, Самарский государственный технический университет ул. Молодогвардейская 244, г. Самара, Россия, dinara-bakieva@mail.ru

Алексей А. Правдин аспирант, кафедра автоматизации и управления в технических системах, Самарский государственный технический университет, ул. Молодогвардейская 244, г. Самара, 443069, Россия, alex_pravdin@inbox.ru

Владимир В. Стулин д.т.н., профессор, кафедра высшей математики и прикладной информатики, Самарский государственный технический университет, ул. Молодогвардейская 244 г. Самара, Россия

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Надежда В. Макарова консультация в ходе исследования
Динара Ф. Валиуллина обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провела эксперимент, выполнил расчёты
Алексей А. Правдин написала рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат
Владимир В. Стулин предложил методику проведения эксперимента и организовал производственные испытания

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 31.07.2016

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 23.08.2016

REFERENCES

1 Sinkha N.K., Hugh I.G. *Nastol'naya kniga proizvoditelya i pererabotchika plodoovoshchnoi produktii* [Manual for Manufacturers and Processors of Fruit and Vegetable Products] Saint-Petersburg. Professiya, 2013. 896 p. (in Russian).

2 Imahori Y., Bai J., Baldwin E. Antioxidative responses of ripe tomato fruit to postharvest chilling and heating treatments. *Scientia Horticulturae*, 2016, vol. 198, no. 1, pp. 398–406.

3 Wang J., You Y., Chen W., Xu Q. et al. Optimal hypobaric treatment delays ripening of honey peach fruit via increasing endogenous energy status and enhancing antioxidant defence systems during storage. *Postharvest Biology and Technology*, 2015, vol. 101, pp. 1–9.

4 Brochier B., Mercali G.D., Marczak L.D.F. Influence of moderate electric field on inactivation kinetics of peroxidase and polyphenol oxidase and on phenolic compounds of sugarcane juice treated by ohmic heating. *LWT – Food Science and Technology*, 2016, vol. 74, pp. 396–403.

5 Zielinska M., Michalska A. Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture. *Food Chem.*, 2016, vol. 212, no. 1, pp. 671–680.

6 Wojdylo A., Figiel A., Legua P., Lech K., Carbonell-Barrachina A.A., Hernandez F. Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried jujube fruits as affected by cultivar and drying method. *Food Chem.*, 2016, vol. 207, no. 5, pp. 170–179.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Nadezhda V. Makarova doc. chem., sci., head of catering technology and organization department, Samara state technical university, 244, Molodogvardeiskaya st., Samara, 443069, Samara, Russia, samara.pitanie@gmail.com

Dinara F. Valiulina cand. tech. sci., senior lecturer, catering technology and organization department, Samara state technical university, 244, Molodogvardeiskaya st., Samara, 443069, Samara, Russia, dinara-bakieva@mail.ru

Aleksei A. Pravdin graduate student, department of automatics and management in technical systems, Samara state technical university, 244, Molodogvardeiskaya st., Samara, 443069, Samara, Russia, alex-pravdin@inbox.ru

Vladimir V. Stulin doc. tech. sci., Professor, advanced maths and applied information science department, Samara state technical university, 244, Molodogvardeiskaya st., Samara, 443069, Samara, Russia

CONTRIBUTION

Nadezhda V. Makarova consultation during the study
Dinara F. Valiulina review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations
Aleksei A. Pravdin wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism
Vladimir V. Stulin proposed a scheme of the experiment and organized production trials

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 7.31.2016

ACCEPTED 8.23.2016