

Ю.А. Медведько, М.А. Таранов. Ростов-на-Дону: Терра, 2006. 590 с.

4. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. М.: Советское радио, 1975. 363 с.

5. Тирринг В. Курс математической и теоретической физики: Монография / Пер. с нем. Киев: Тимпани, 2004. 264 с.

6. Кочергин В.И. Теория многомерных цифро-векторных множеств. Томск: Изд-во Томского университета, 2006. 380 с.

7. Справочник по орошаемому земледелию / Сост. проф. Н.А. Мосиенко. Саратов: Приволжское книжное изд-во, 1993. 432 с.

3. Eroshenko G.P., Medvedko Yu.A., Taranov M.A. Eksploatatsiya energooborudovaniya sel'skokhozyaystvennykh predpriyatiy [Operation of power equipment in agricultural enterprises]. Rostov-on-Don: Terra, 2006: 590. (In Rus.)

4. Gutkin L.S. Optimizatsiya radioelektronnykh ustroystv po sovokupnosti pokazateley kachestva [Optimization of electronic devices by a set of quality indicators]. Moscow, Sov. radio, 1975: 363. (In Rus.)

5. Thirring V. Kurs matematicheskoy i teoreticheskoy fiziki: monografiya per. s nem [Course of mathematical and theoretical physics: Monograph, translated from German]. Kiev, Timpani, 2004: 264. (In Rus.)

6. Kochergin V.I. Teoriya mnogomernykh tsifro-vektornykh mnozhestv [Theory of multidimensional digital-vector sets]. Tomsk, Izd-vo Tom. un-ta, 2006: 380. (In Rus.)

7. Spravochnik po oroshaemomu zemledeliyu [Handbook of irrigated agriculture]. Comp. by Prof. N.A. Mosienko. Saratov, Privolzh. book publishing house, 1993: 432. (In Rus.)

Критерии авторства

Бакиров С.М. выполнил теоретические исследования, на основании которых провел обобщение и написал рукопись. Бакиров С.М. имеет на статью авторские права и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 25.06.2020

Опубликована 30.10.2020

Contribution

S.M. Bakirov carried out theoretical studies, generalized the obtained results and wrote the manuscript S.M. Bakirov has author's rights and bears responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received on June 25, 2020

Published 30.10.2020

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА / POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL ARTICLE

УДК 664.8.039.51: 58.02

DOI: 10.26897/2687-1149-2020-5-56-63



КИНЕТИКА ВЛАГОУДАЛЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ВИТАМИНА С ПРИ ИНФРАКРАСНОЙ СУШКЕ ЯГОД И ФРУКТОВ В МНОГОЯРУСНОМ ШКАФНОМ УСТРОЙСТВЕ

ЗАВАЛИЙ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ, докт. техн. наук, доцент¹

E-mail: zavalym@mail.ru

ЛАГО ЛЮДМИЛА АНАТОЛЬЕВНА, ассистент¹

E-mail: Luda_Lago@mail.ru

РЫБАЛКО АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ, младший научный сотрудник²

E-mail: alex_ark_simf@mail.ru

¹ Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, 295007, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4

² Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, 295493, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150

Для аналитического описания разрушения витамина С в процессе инфракрасной сушки растительного сырья использована модель химической кинетики первого порядка, в которой для учета влияния температуры на скорость моделируемых процессов применимо уравнение Аррениуса. По экспериментальным данным инфракрасной сушки ягод малины и нарезанных дольками яблок определены коэффициенты модели. На основе анализа процессов сушки с использованием полученных моделей установлена взаимосвязь между температурой сырья, временем теплового воздействия на сырье

и разрушением витамина С в ягодах и фруктах в процессах инфракрасной сушки. Сформулированы также положения, выполнение которых необходимо для максимального сохранения нативных свойств сырья при его сушке в многоярусном шкафом устройстве, а именно: минимизировать контакт поверхности сырья с окислительной окружающей средой; производить сушку при минимальной неравномерности температуры сырья в объеме устройства сушки и за короткое время при максимально возможных допустимых температурах сырья в условиях атмосферного давления в устройстве сушки.

Ключевые слова: инфракрасная сушка, химическая кинетика, растительное сырье, содержание витамина С.

Формат цитирования: Завалий А.А., Лаго Л.А., Рыбалко А.С. Кинетика влагоудаления и разрушения витамина С при инфракрасной сушке ягод и фруктов в многоярусном шкафом устройстве // *Агроинженерия*. 2020. № 5(99). С. 56-63. DOI: 10.26897/2687-1149-2020-5-56-63.

KINETICS OF DEHUMIDIFICATION AND DESTRUCTION OF VITAMIN C CONTENT DURING INFRARED DRYING OF FRUIT AND BERRIES IN A MULTI-TIERED DRIER UNIT

ALEKSEI A. ZAVALII, Head of Department, DSc (Eng), Associate Professor¹

E-mail: zavalym@mail.ru

LUDMILA A. LAGO, Assistant Lecturer¹

E-mail: Luda_Lago@mail.ru

ALEKSANDR S. RYBALKO, Junior Research Engineer²

E-mail: alex_ark_simf@mail.ru

¹ V.I. Vernadsky Crimean Federal University; 295007, Vernadskogo Ave., 4, Simferopol, Republic of Crimea

² Research Institute of Agriculture of Crimea; 295493,150, Kievskaya Str., Simferopol, Republic of Crimea

The first-order model of chemical kinetics was applied for an analytical description of the destruction of vitamin C content during the infrared (IR) drying of plant materials. In this model, the authors used the Arrhenius equation to describe the temperature influence on the speed of the simulated processes. The coefficients of the model were determined by the experimental data for IR drying of raspberries and sliced apples. The authors found the relationship between the temperature of raw materials, the time of heat exposure and destruction of vitamin C in fruit and berries during IR drying. The study determined the requirements for maximum preservation of the native properties of raw materials during their drying in a multilevel drying machine. They include minimizing the contact of the raw material surface with an oxidizing environment; carrying out drying at a minimum temperature irregularity of raw materials and over a short time at the maximum permissible temperatures of raw materials under atmospheric pressure in the drier unit.

Key words: infrared drying, chemical kinetics, plant materials, vitamin C.

For citation: Zavalii A.A., Lago L.A., Rybalko A.S. Kinetics of dehumidification and destruction of vitamin C content during infrared drying of fruit and berries in a multi-tiered drier unit. *Agricultural Engineering*, 2020; 5 (99): 56-63. (In Rus.). DOI: 10.26897/2687-1149-2020-5-56-63.

Введение. Свойствами инфракрасной сушки, способствующими сохранению витаминного состава сырья в продукте сушки, являются отсутствие интенсивного контакта поверхности сырья с окружающим воздухом, высокая управляемость тепловых режимов сушки, возможность равномерного подвода теплоты ко всей поверхности сырья, экологическая безопасность, высокая эффективность устройств в широком диапазоне тепловой мощности и производительности [1, 2].

Для определения режимов, обеспечивающих максимально возможное сохранение нативных свойств сырья, необходимо установить закономерности изменения количества полезных веществ в сырье в процессе сушки [3].

Для анализа выбран витамин С, содержащийся в высокой концентрации в ягодах и фруктах, быстро разлагающийся в сырых продуктах и обладающий высокой лабильностью к термическому воздействию [4, 5].

Цель исследований: анализ кинетики разрушения витамина С при инфракрасной сушке ягод малины и яблок в многоярусном шкафом устройстве.

Материал и методы. Степень сохраняемости биологически активных веществ в продукте сушки определялась методами теплового воздействия на сырье и удаления из него влаги, конструкцией устройства и режимами сушки.

Сушка выполнялась в 10-ярусном шкафом устройстве КМ 5/06 рабочим объемом 0,6 м³ [6]. Устройство позволяет размещать до 30 кг сырья на сетчатых лотках размером 500 × 1000 мм. Режим сушки в устройстве КМ 5/06 включает в себя задание температуры сырья в ходе сушки и гистерезиса релейного регулирования этой температуры. Контроль температуры осуществляется по показаниям измерительного преобразователя (термопары с открытым рабочим спаем диаметром 0,3 мм), чувствительный элемент которого размещен в поверхностном слое сырья на глубине 1...3 мм. Такой способ контроля обеспечивает максимально достижимое качество поддержания заданной температуры сырья независимо от периода сушки (разогрев, период постоянной скорости сушки, период падающей скорости сушки) [7, 8].

В основе аналитического описания процессов химических превращений лежат модели химической кинетики [9, 10, 11], которые представляют собой дифференциальные уравнения различного порядка, являющиеся в общем случае нелинейными. Для описания зависимостей концентрации вещества от времени в ходе химической реакции используют простейшие линейные модели нулевого, первого или второго порядков.

Для исследования скорости разрушения витамина С используют модели первого порядка, а для учета влияния температуры на скорость разрушения применяют уравнение Аррениуса [4]:

$$k(T) = A \cdot e^{-Ea/\mu R T}, \quad (1)$$

где $k(T)$ – константа скорости первого порядка; A – предэкспоненциальный множитель; Ea – энергия активации; μR – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.

В уравнении (1) величины предэкспоненциального множителя A и энергии активации Ea зависят от множества факторов, определяемых свойствами сырья, и подлежат идентификации по результатам экспериментального исследования кинетики разрушения витамина С.

Модели кинетики первого и более высоких порядков применяют для описания процессов, в которых происходит изменение условий осуществления реакции: в частности, разрушение витамина С в растительном сырье происходит в условиях ограниченного контакта реагентов в клеточной структуре сырья, а в ходе сушки изменяется содержание влаги в клетках и межклеточном пространстве, что ухудшает условия контакта реагентов. Уравнение необратимого изменения концентрации витамина С во времени для модели первого порядка имеет вид:

$$k(T) \cdot \frac{dC(\tau, T)}{d\tau} = C(\tau, T), \quad (2)$$

где $C(\tau, T)$ – концентрация витамина С; $k(T)$ – константа скорости первого порядка по уравнению (1); τ – время.

При н.у. $\tau = 0$ и $C = C_0$ – начальная концентрация витамина С. Интегрированием уравнения (2) получаем зависимость изменения концентрации витамина С во времени:

$$c(\tau, T) = C_0 \cdot e^{-k(T) \cdot \tau}. \quad (3)$$

Для описания процесса влагоудаления из сырья в ходе сушки применяют динамические модели первого порядка. К таким моделям можно отнести полуэмпирическое уравнение расчета кинетики сушки материалов во втором периоде Шервуда-Лыкова [12]:

$$-\frac{du}{d\tau} = K \cdot (u - u_p), \quad (4)$$

где u – среднееобъемное влагосодержание материала в текущий момент (кг влаги)/(кг сухого вещества); u_p – равновесное влагосодержание материала (кг влаги)/(кг сухого вещества); K – коэффициент сушки, 1/с.

Величина K может быть принята постоянной для всего процесса сушки или изменяющейся [12].

Интегрированием уравнения (4) получаем зависимость изменения влагосодержания во времени:

$$u = u_p + (u_0 - u_p) \cdot e^{-K \cdot \tau}, \quad (5)$$

где u_0 – начальное влагосодержание (кг влаги)/(кг сухого вещества) для процессов сушки в отсутствие первого периода.

Зависимость коэффициента сушки K от температуры сырья в ходе сушки следует учесть выражением:

$$K(t) = Ak \cdot e^{-Bk/t^{Ck}}, \quad (6)$$

где Ak – предэкспоненциальный множитель; Bk и Ck – коэффициенты; t – температура.

Численные значения коэффициентов Ak , Bk и Ck подлежат идентификации по результатам экспериментов.

Для идентификации коэффициентов уравнений (1)-(6) при сушке малины использовались экспериментальные данные двух серий экспериментов, отличающихся периодом выполнения сушек. Для сушки использовали малину сорта «Полана», поставляемую с частной плантации в с. Победное Джанкойского района Республики Крым (табл. 1). Условия эксперимента: диапазон температур – от 50 до 65°C, скорость движения воздуха в устройстве сушки – 0,05...0,055 м/с; температура воздуха на входе в устройство – 25±3°C; влажность воздуха на входе в устройство – 45...55%.

Содержание витамина С в сырых ягодах варьировало от 99,3 до 625,1 мг/100 г в пересчете на сухое вещество, что связано со временем сбора ягод и степенью зрелости (для более позднего сбора характерно большое содержание витамина С). Доля сохраненного витамина определялась для каждого опыта. Ягоды малины для сушки выкладывались на лотки в один слой.

Для идентификации коэффициентов уравнений (1)-(6) при сушке яблок использовали экспериментальные данные двух серий экспериментов, отличающихся способом управления тепловым воздействием на сырье. Содержание витамина С в сырых плодах варьировалось от 31,1 до 45,34 мг/100 г в пересчете на сухое вещество. Доля сохраненного витамина определялась для каждого опыта. В экспериментах использовали одноканальное и двухканальное управление источниками питания устройства сушки КМ 5/06. При одноканальном управлении питание источников теплового излучения всех ярусов устройства осуществляется по сигналу от одного измерительного преобразователя температуры, расположенного на третьем лотке сверху. При двухканальном управлении питание первых пяти ярусов управляется измерительным преобразователем, расположенным на третьем лотке сверху, а остальные пять ярусов – измерительным преобразователем, расположенным на шестом лотке сверху [8].

Перед сушкой яблоки нарезались плоским дольками толщиной от 4 до 9 мм и выкладывались в 1,5...2 слоя. Сушка осуществлялась при температуре сырья 45°C с гистерезисом релейного управления ±1°C. Эксперимент проводили при скорости движения воздуха в устройстве сушки 0,05...0,055 м/с; температуре воздуха на входе в устройство 18,5±1,8°C; влажности воздуха на входе в устройство 46...62%.

Результаты и обсуждение. Применение модели (5) является корректным для проведенного эксперимента при отсутствии в процессе сушки первого периода. Косвенным показателем наличия или отсутствия первого периода сушки является частота срабатывания релейного регулятора, поддерживающего заданное значение температуры сырья в ходе сушки. В первом периоде сушки частота является постоянной, так как поступающий тепловой поток в сырье компенсируется испарением влаги. Если поверхностный слой сырья теряет влагу и не способен компенсировать поток теплоты, то частота срабатывания

релейного регулятора нарастает. Нарастающий характер частоты срабатывания релейного регулятора характерен для всех выполненных экспериментов, поэтому можно с высокой степенью достоверности принять, что

в экспериментах первый период сушки отсутствует, а модель (5) может быть применима для их описания [14].

Экспериментальные данные сушки малины представлены в таблице 1.

Таблица 1

Экспериментальные данные сушки малины сорта «Полана»

Table 1

Experimental data for drying raspberries varieties «Polana»

| Размер выборки Sample size | Температура, С Temperature, C | Время сушки, ч Drying time, h | Влажность, % Humidity, % | Среднее влагосодержание, кг влаги/кг сухого вещества Average moisture content, kg moisture/kg dry matter | Витамин С, % сохранения Vitamin C, % conservation |
|--|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---|--|
| 1-я серия, период сушки с 16.07.2019 г. по 28.07.2019 г. / 1st series, drying period from 16.07.2019 to 28.07.2019 | | | | | |
| 21 | Сырье Raw materials | | 79,53±2,23 | 4,0 | |
| 5 | 50±1 | 24±1,4 | 5,1±0,76 | 0,053 | 46,7±0,52 |
| 4 | 55±1 | 17±0,5 | 5,07±0,67 | 0,054 | 49,7±0,84 |
| 5 | 60±1 | 12±0,8 | 4,69±0,72 | 0,052 | 53,1±0,37 |
| 7 | 65±1 | 9±0,5 | 4,99±0,58 | 0,05 | 55,2±1,02 |
| 2-я серия, период сушки с 11.07.2017 г. по 26.08.2017 г. / 2nd series, drying period from 11.07.2017 to 26.08.2017 | | | | | |
| 16 | Сырье Raw materials | | 80,12±2,35 | 4,0 | |
| 3 | 50±1 | 25±3,7 | 10,21±3,14 | 0,11 | 45,1±2,56 |
| 4 | 55±1 | 18,5±2,5 | 10,5±1,80 | 0,12 | 46,2±1,51 |
| 4 | 60±1 | 14,0±1,1 | 9,05±1,20 | 0,10 | 47,5±1,93 |
| 5 | 65±1 | 9,5±1,2 | 9,13±0,92 | 0,10 | 51,5±2,09 |

Примечание. Предельные отклонения в таблице приведены для доверительной вероятности $P = 0,9$ [13].

На рисунке 1 приведены расчетные кривые, полученные с использованием модели (3) разрушения витамина С и модели (5) изменения влагосодержания сырья в ходе сушки. Разрушение витамина С в экспериментах первой серии описывается уравнением регрессии $y = -0,573x + 59,91$ с коэффициентом корреляции 0,995, а данные второй серии – $y = -0,384x + 53,97$ с коэффициентом корреляции 0,92, что свидетельствует об устойчивом снижении содержания витамина С при уменьшении температуры сырья в ходе сушки.

Расчетные кривые разрушения витамина С подтверждают вывод о снижении содержания витамина С в продукте сушки при снижении температуры сырья по причине увеличения продолжительности сушки с целью достижения заданного значения влажности продукта сушки.

Значения коэффициентов уравнений (1)-(6), использованные при построении кривых 1с ... 4с и 1у ... 4у на рисунке 1, представлены в таблице 2.

Экспериментальные данные сушки яблок приведены в таблице 3. На рисунке 2 приведены расчетные кривые разрушения витамина С и снижения влагосодержания в ходе сушки яблок с использованием моделей (3) и (5). Значения коэффициентов уравнений (1)-(6), использованные при построении этих кривых, представлены в таблице 4.

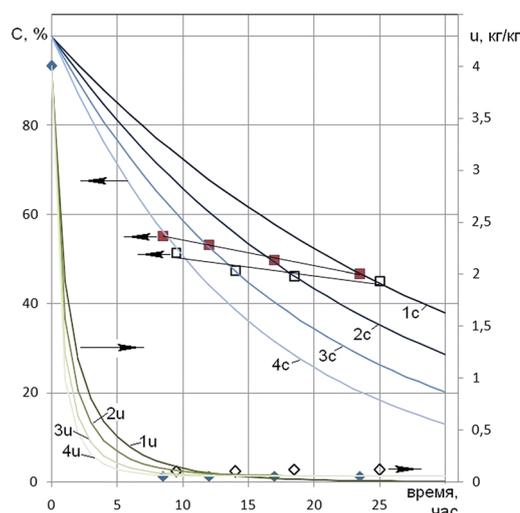


Рис. 1. Описание разрушения витамина С (С, %) и снижение влагосодержания (u, кг/кг) в ходе сушки малины:

1 – $t = 50^\circ\text{C}$; 2 – $t = 55^\circ\text{C}$; 3 – $t = 60^\circ\text{C}$; 4 – $t = 65^\circ\text{C}$;
1-я серия: \blacklozenge – влагосодержание, кг/кг; \blacksquare – витамин С, %;
2-я серия: \diamond – влагосодержание, кг/кг; \square – витамин С, %

Fig. 1. Description of the vitamin C destruction (C, %) and the reduction of moisture content during raspberry drying:

1 – $t = 50^\circ\text{C}$; 2 – $t = 55^\circ\text{C}$; 3 – $t = 60^\circ\text{C}$; 4 – $t = 65^\circ\text{C}$; 1st series:
 \blacklozenge – moisture content; \blacksquare – the content of vitamin C
2nd series:
 \diamond – moisture content; \square – the content of vitamin C

Таблица 2

Значения коэффициентов уравнений (1)-(6) для сушки малины

Table 2

The values of the coefficients of equations (1)-(6) for raspberry drying

| | | | | | | | |
|----------|---------|-----|-------|------|------|----------|------|
| u [15] | μR | A | Ea | Co | Ck | Ak | Bk |
| 0,0153 | 8,3142 | 170 | 45000 | 100 | 1,45 | 1,20E-03 | 900 |

Таблица 3

Экспериментальные данные сушки яблок

Table 3

Experimental data for apple drying

| Размер выборки Sample size | Температура, С Temperature, C | Время сушки, ч Drying time, h | Влажность, % Humidity, % | Среднее влагосодержание, кг влаги/кг сухого вещества Average moisture content, kg moisture / kg dry matter | Витамин С, % сохранения Vitamin C, % conservation |
|--|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---|--|
| Одноканальное управление, период сушки с 14.11.2017 г. по 19.12.2017 г. <i>Single-channel control, drying period from 14.11.2017 to 19.12.2017</i> | | | | | |
| 76 | Сырье / Raw materials | | 77,08±3,65 | 3,85 | |
| 76 | 45±1 | 13,7±1,5 | 17,85±4,62 | 0,22 | 53,62±8,42 |
| Двухканальное управление, период сушки с 22.09.2017 г. по 25.10.2017 г. <i>Two-channel control, drying period from 22.09.2017 to 25.10.2017</i> | | | | | |
| 105 | Сырье / Raw materials | | 79,4±2,07 | 3,97 | |
| 105 | 45±1 | 12,2±1,5 | 16,23±3,4 | 0,19 | 62,1±11,6 |

Примечание. Предельные отклонения в таблице приведены для доверительной вероятности $P = 0,9$ [13].

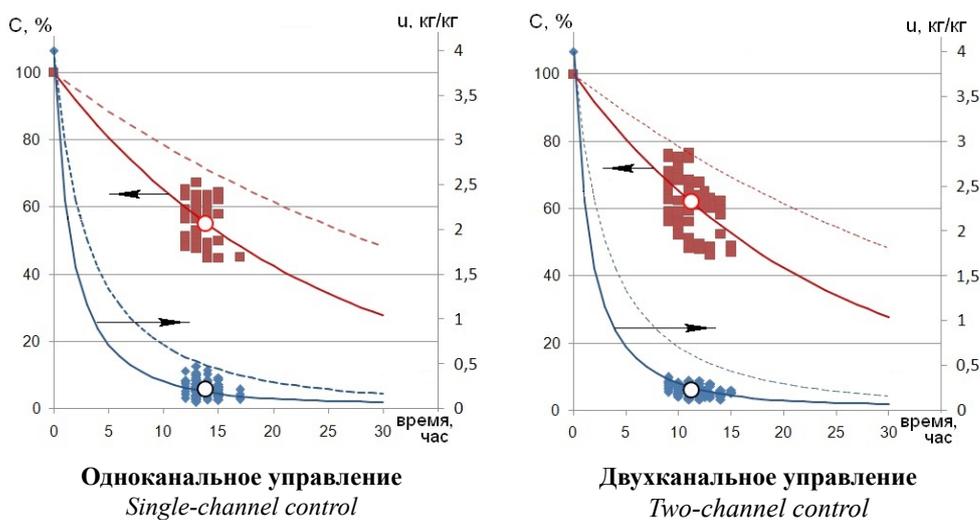


Рис. 2. Разрушение витамина С (С, %) и снижение влагосодержания (u, кг/кг) в ходе сушки яблок:

— расчетная кривая разрушения витамина С; - - - - - кривые со значениями коэффициентов для сушки малины (из табл. 2);
 ○ – средневывборочные значения содержания витамина С и влагосодержания; ■ – витамин С, %;
 ◆ – влагосодержание; — — — — — среднее влагосодержание

Fig. 2. Description of the vitamin C destruction (C, %) and the reduction of moisture content during apple drying:

— the theoretical curve of vitamin C destruction; - - - - - curves with values of coefficients for raspberry drying (from Table 2);
 ○ – sample average values of vitamin C and moisture content; ■ – the content of vitamin C, %; ◆ – moisture content;
 — — — — — average moisture content

Экспериментальные данные, полученные при сушке яблок, имеют существенно больший разброс значений по сравнению с экспериментальными данными, полученными при сушке малины. Это объясняется не только разнообразием сортового состава высушиваемых яблок,

но и различными значениями толщины и диаметра долек яблок. Данные на рисунке 2 приведены без выбраковки, что позволяет получить объективное представление о тенденции разрушения витамина С при увеличении времени сушки.

Значения коэффициентов уравнений (1)-(6) для сушки яблок

Table 4

The values of the coefficients of equations (1)-(6) for drying apples

| u [16] | μR | A | Ea | Co | Ck | Ak | Bk |
|----------|---------|-----|-------|------|-------|----------|------|
| 6,0 | 8,3142 | 166 | 43500 | 100 | 1,445 | 1,60E-03 | 900 |

Значения коэффициентов в таблице 4 определены для средневыворочных величин содержания витамина С и влагосодержания при двухканальном управлении тепловым воздействием на сырье. В источнике [8] сформулировано предположение о том, что меньшему разрушению витамина С при двухканальном управлении способствует более равномерное поддержание температуры сырья в объеме устройства сушки по его высоте. При одноканальном управлении сушка сырья, размещенного на верхних лотках устройства, выполняется при более высокой температуре по сравнению с температурой, заданной регулятором, так как это сырье омывается воздухом, нагретым при движении снизу вверх сквозь нижние лотки.

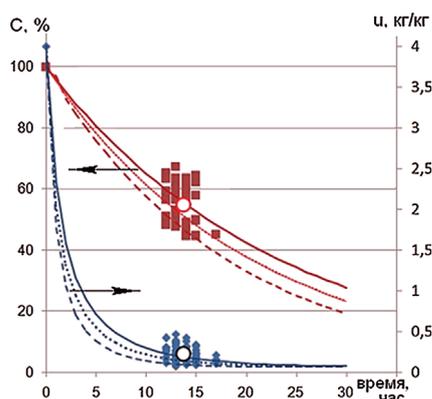


Рис. 3. Разрушение витамина С (С, %) и снижение влагосодержания (u, кг/кг) в ходе сушки яблок при одноканальном управлении:

- – витамин С, %; ○ – средневыворочные значения содержания витамина С и влагосодержания;
- — — — — расчетная кривая разрушения витамина С при 45°C;
- - - - - расчетная кривая разрушения витамина С при 50°C;
- ◆ – влагосодержание; ◆◆◆◆ – среднее значение расчетной кривой разрушения витамина С;
- — — — — влагосодержание при 45°C;
- - - - - влагосодержание при 50°C;
- – среднее влагосодержание

Fig. 3. Description of the destruction of vitamin C and reduction of moisture content during (u, kg/kg) the drying of apples during single-channel control:

- – vitamin C, %; ○ – sample average values of vitamin C content and moisture content;
- — — — — the calculated curve of destruction of vitamin C at 45°C;
- - - - - the calculated curve of destruction of vitamin C at 50°C;
- ◆ – moisture content; ◆◆◆◆ – average value of the calculated curve of vitamin C destruction;
- — — — — moisture content at 45°C;
- - - - - moisture content at 50°C;
- – average moisture content

Модели (1)-(6) с коэффициентами таблицы 4 позволяют обосновать указанное предположение. На рисунке 3

приведены кривые разрушения витамина С и снижения влагосодержания с использованием моделей (3) и (5) для температуры сушки 45 и 50°C. Если предположить, что половина сырья имеет температуру 45°C, а вторая половина – 50°C, то изменение содержания витамина С и влагосодержания в первом приближении будет проходить по кривой, эквидистантной по оси ординат кривым для температур 45 и 50°C или по кривой для температуры 47,5°C, отличие которой от эквидистанты не превышает 2% (на рисунке 3 кривые практически совпадают).

Таким образом, неравномерность температуры сырья по высоте многоярусного устройства сушки приводит к дополнительным потерям витамина С: если управление выполняется по более горячему сырью, то дополнительные потери витамина С связаны с более длительным процессом сушки до заданной величины влажности продукта; если управление выполняется по более холодному сырью, то дополнительные потери витамина С связаны с интенсивным снижением содержания витамина в более горячем сырью.

Отличие коэффициентов модели разрушения витамина С и снижение влагосодержания в процессе сушки для малины и яблок составили для величины Ea 3,3%, остальные коэффициенты одинаковы по величине. Дольки яблок имеют большую площадь поверхности сердцевинки плода, контактирующую с атмосферным воздухом в устройстве сушки, в то время как поверхность ягод малины защищена кожицей, то есть окислительные процессы на поверхности долек яблок происходят более интенсивно, чем на поверхности ягод малины, а влагоудаление с незащищенной оболочкой поверхности дольки яблока требует меньших затрат энергии. Эти отличия процессов сушки ягод малины и долек яблока могут служить одним из объяснений меньшего значения величины Ea для яблок по сравнению с малиной. У долек яблок энергия активации разрушения витамина С ниже, а чувствительность интенсивности сушки к температуре сырья выше, чем у ягод малины.

Выводы

1. Модель кинетики первого порядка позволяет установить взаимосвязь между температурой сырья, временем теплового воздействия на сырье и степенью разрушения витамина С в ягодах и фруктах в процессах сушки.

2. Анализ процессов сушки с использованием модели кинетики позволяет сформулировать положения, выполнение которых необходимо для максимального сохранения нативных свойств сырья при его сушке, а именно:

– необходимо минимизировать контакт поверхности сырья с окислительной окружающей средой;

– процесс сушки следует выполнять при минимально возможной неравномерности температуры сырья в объеме устройства сушки;

– сушку следует выполнять в течение короткого времени при максимально возможных допустимых температурах сырья в условиях атмосферного давления в устройстве сушки.

Библиографический список

1. Завалий А.А. Разработка и тепловое моделирование устройств инфракрасной сушки термолabile материалов / А.А. Завалий, Ю.Ф. Снежкин. Симферополь: Ариал, 2016. 263 с.
2. Завалий А.А. Инфракрасная сушка растительно-го сырья // Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства: Сборник научных трудов Международного научно-технического семинара, посвященного 175-летию со дня рождения К.А. Тимирязева (Москва, 22-23 мая 2018 г.). М.: Перо, 2018. С. 92-98.
3. Лаго Л.А., Рыбалко А.С., Завалий А.А. Оптимальный режим инфракрасной сушки модели капиллярно-коллоидного тела // V научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов, студентов и молодых ученых «Дни науки КФУ им. В.И. Вернадского»: Сборник тезисов участников. Симферополь, 2019. С. 101-103.
4. Девис М. Витамин, С. Химия и биохимия / М. Девис Дж. Остин, Д. Патридж. М.: Мир, 1999. 176 с.
5. Смирнов В.А. Витамины и коферменты: Учебное пособие. Ч. 2 / В.А. Смирнов, Ю.Н. Климошкин. Самара: Самарский государственный техн. университет, 2008. 91 с.
6. Устройство для импульсной инфракрасной сушки термолabile материалов: Патент 193685 РФ: МПК51 F26 В9/06 (2006.01) F26 В3/30 (2006.01) / А.А. Завалий, В.С. Паштецкий, В.С. Рутенко, А.С. Рыбалко, Л.А. Лаго; заявл. 20.03.2019 г.; опубл. 11.11.2019 г. // Бюллетень № 32. 11 с.
7. Лаго Л.А., Рыбалко А.С. Оптимизация температурного режима инфракрасной сушки ягод малины в многоярусном компактном устройстве // Материалы докладов II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Инновационные технологии пищевых производств» (12-13 декабря 2019 г., Севастополь). Севастополь: СевГУ, 2020. С. 3-4.
8. Завалий А.А., Лаго Л.А. Исследование равномерности процесса инфракрасной сушки растительного сырья в многоярусном шкафом устройстве // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2019. № 17 (180). С. 115-122.
9. Франк-Каменицкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. 3-е изд., испр. и доп. М.: Наука, 1987. 492 с.
10. Поленов Ю.В., Егорова Е.В. Кинетика химических реакций: Учебное пособие. Иваново: Ивановский государственный химико-технологический университет, 2010. 68 с.
11. Штиллер В. Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика: Пер. с англ. М.: Мир, 2000. 176 с.
12. Рудобашта С.П., Дмитриев В.М. Экспериментальное исследование процесса конвективной сушки нарезанных яблок // Материалы I Всероссийской конференции с международным участием «Импортозамещающие технологии и оборудование для глубокой комплексной переработки сельскохозяйственного сырья» (24-25 мая 2019 г.). Тамбов, 2019. С. 276-281.

References

1. Zavaliiy A.A., Snezhkin Yu.F. Razrabotka i teplovoe modelirovanie ustroystv infrakrasnoy sushki termolabil'nykh materialov [Development and thermal modeling of infrared drying devices for thermolabile materials]. Simferopol'. Arrial, 2016: 263. (In Rus.)
2. Zavaliiy A.A. Infrakrasnaya sushka rastitel'nogo syr'ya [Infrared drying of plant raw materials]. *Sushka, khranenie i pererabotka produktsii rastenievodstva: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminara, posvyashchennogo 175-letiyu so dnya rozhdeniya K.A. Timiryazeva*. Moscow, Pero, 2018: 92-98. (In Rus.)
3. Lago L.A., Rybalko A.S., Zavaliiy A.A. Optimal'nyy rezhim infrakrasnoy sushki modeli kapillyarno-kolloidnogo tela [Optimal infrared drying mode of a capillary-colloidal body model]. *V nauchno-prakticheskaya konferentsiya professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov, studentov i molodykh uchenykh "Dni nauki KFU im. V.I. Vernadskogo"*: sbornik tezisev uchastnikov. Simferopol', 2019: 101-103. (In Rus.)
4. Devis M., Ostin Dzh., Patridzh D. Vitamin, S. Khimiya i biokhimiya [Vitamin S. Chemistry and biochemistry]. Moscow, Mir, 1999: 176. (In Rus.)
5. Smirnov V.A., Klimochkin Yu.N. Vitaminy i kofermenty: uchebnoe posobie. Ch. 2 [Vitamins and coenzymes: Study manual. Part 2]. Samara, Samar. gos. tekhn. un-t, 2008: 91. (In Rus.)
6. Zavaliiy A.A., Pashtetskiy V.S., Rutenko V.S., Rybalko A.S., Lago L.A. Ustroystvo dlya impul'snoy infrakrasnoy sushki termolabil'nykh materialov [Device for pulsed infrared drying of thermolabile materials]: pat. 193685 Ros. Federatsiya: MPK51 F26 V9.06 (2006.01) F26 V3.30 (2006.01), 2019. (In Rus.)
7. Lago L.A., Rybalko A.S. Optimizatsiya temperaturnogo rezhima infrakrasnoy sushki yagod maliny v mnogoyarusnom kompaktnom ustroystve [Optimization of the temperature mode of infrared drying of raspberries in a multi-tiered compact unit]. *Materialy dokladov II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Innovatsionnye tekhnologii pishchevykh proizvodstv"*. Sevastopol', SevGU, 2020: 3-4. (In Rus.)
8. Zavaliiy A.A., Lago L.A. Issledovanie ravnomernosti protsessy infrakrasnoy sushki rastitel'nogo syr'ya v mnogoyarusnom shkafnom ustroystve [Study of the uniformity of infrared drying of plant raw materials in a multi-tiered drier unit]. *Izvestiya sel'skokhozyaystvennoy nauki Tavridy*, 2019; 17 (180): 115-122. (In Rus.)
9. Frank-Kamenetskiy D.A. Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike [Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. 3rd ed., reviewed and extended. Moscow, Nauka, 1987: 492. (In Rus.)
10. Polenov Yu.V., Egorova E.V. Kinetika khimicheskikh reaktsiy: ucheb. posobie [Kinetics of chemical reactions: Study manual]. Ivanovo, Ivan. gos. khim.-tekhnol. un-t, 2010: 68. (In Rus.)
11. Shtiller V. Uravnenie Arrheniusa i neravnovesnaya kinetika / Translated from English. [Arrhenius Equation

13. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1985. 248 с.

14. Завалий А.А., Лаго Л.А., Рыбалко А.С. Анализ термограмм импульсной инфракрасной сушки растительного сырья // *Агроинженерия*. 2020. № 3 (97). С. 55-59.

15. Никитина Л.М. Таблицы равновесного удельного влагосодержания и энергии связи влаги с материалом / Под. ред. акад. АН БССР А.В. Лыкова. М. – Л.: Госэнергиздат, 1963. 174 с.

16. Царьков Д.В., Рудобашта С.П. Гигроскопические свойства нарезанных яблок // *Материалы I Всероссийской конференции с международным участием «Импортозамещающие технологии и оборудование для глубокой комплексной переработки сельскохозяйственного сырья»* (24-25 мая 2019 г.). Тамбов, 2019. С. 281-286.

and non-equilibrium kinetics]. Moscow, Mir, 2000: 176. (In Rus.)

12. Rudobashta S.P., Dmitriev V.M. Eksperimental'noe issledovanie protsessa konvektivnoy sushki narezannykh yablok [Experimental study of the process of convective drying of sliced apples]. *Materialy I Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Importozameshchayushchie tekhnologii i oborudovanie dlya glubokoy kompleksnoy pererabotki sel'skokhozyaystvennogo syr'ya"*. Tambov, 2019: 276-281. (In Rus.)

13. Novitskiy P.V., Zograf I.A. Otsenka pogreshnostey rezul'tatov izmereniy [Estimation of errors in measurement results]. Leningrad, Energoatomizdat, Leningr. otd-nie, 1985: 248. (In Rus.)

14. Zavaliy A.A., Lago L.A., Rybalko A.S. Analiz termogramm impul'snoy infrakrasnoy sushki rastitel'nogo syr'ya [Analysis of thermograms of pulsed infrared drying of plant raw materials]. *Agroinzheneriya*, 2020; 3 (97): 55-59. (In Rus.)

15. Nikitina L.M. Tablitsy ravnovesnogo udel'nogo vlagosoderzhaniya i energii svyazi vlagi s materialom [Tables of equilibrium specific moisture content and binding energy of moisture with the material]. Ed. by acad. of AN BSSR A.V. Lykov. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat, 1963: 174. (In Rus.)

16. Tsar'kov D.V., Rudobashta S.P. Gigroskopicheskie svoystva narezannykh yablok [Hygroscopic properties of sliced apples]. *Materialy I Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Importozameshchayushchie tekhnologii i oborudovanie dlya glubokoy kompleksnoy pererabotki sel'skokhozyaystvennogo syr'ya"*. Tambov, 2019: 281-286. (In Rus.)

Критерии авторства

Завалий А.А., Лаго Л.А., Рыбалко А.С. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент. Завалий А.А., Лаго Л.А., Рыбалко А.С. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 01.09.2020

Опубликована 30.10.2020

Contribution

A.A. Zavaliy, L.A. Lago, A.S. Rybalko carried out theoretical studies and conducted the experiment based on the obtained theoretical results. A.A. Zavaliy, L.A. Lago, A.S. Rybalko have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received on September 1, 2020

Published 30.10.2020