

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2391>  
<https://elibrary.ru/TQRZQB>

Оригинальная статья  
<https://fptt.ru>

## Сушка растительных материалов, обработанных низкотемпературной плазмой



И. А. Шорсткий

Кубанский государственный технологический университет , Краснодар, Россия

Поступила в редакцию: 11.02.2022  
Принята после рецензирования: 15.03.2022  
Принята к публикации: 05.04.2022

И. А. Шорсткий: [i-shorstky@mail.ru](mailto:i-shorstky@mail.ru),  
<https://orcid.org/0000-0001-5804-7950>

© И. А. Шорсткий, 2022



### Аннотация.

Переход к эффективному производству требует построения научных основ для развития энергосберегающих технологий и процессов сушки растительных материалов для их преобразования в продукты с функциональными свойствами. Математическое моделирование и управление процессом сушки имеет большое значение для прогнозирования ее хода и обеспечения эффективной переработки растительных материалов, предварительно обработанных низкотемпературной плазмой.

В работе были использованы растительные материалы: яблоко сорта Гренни Смит и картофель сорта Боровичок. В качестве электрофизической обработки использовали воздействие низкотемпературной плазмы атмосферного давления в воздушной газовой среде. За основную модель тепломассопереноса приняли модель Лыкова через систему связанных дифференциальных уравнений потенциала влажности и температуры. Математический аппарат и программный код реализовывали в программной среде MathCAD.

В результате обработки низкотемпературной плазмой атмосферного давления в воздушной газовой среде отмечено снижение длительности сушки растительных материалов. При росте величины индекса дезинтеграции установлено снижение общей длительности процесса сушки. Математический аппарат модели тепломассопереноса при сопоставлении с данными эксперимента сушки растительных материалов показал высокую схожесть результатов. На основе анализа кинетических коэффициентов переноса потенциалов тепла, влаги и давления предложен управляющий параметр процесса сушки растительных материалов – индекс дезинтеграции.

Предлагаемый математический аппарат дает возможность провести объяснения возникающих эффектов, а уточненные кинетические коэффициенты на основе экспериментальных данных способствуют объяснению процессов, протекающих в объекте сушки.

**Ключевые слова.** Сушка, тепломассоперенос, управление процессом сушки, электрофизическая обработка, низкотемпературная плазма, индекс дезинтеграции, численное моделирование

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 21-79-00112, <https://rscf.ru/project/21-79-00112>

**Для цитирования:** Шорсткий И. А. Сушка растительных материалов, обработанных низкотемпературной плазмой // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 3. С. 613–622. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2391>

## Cold Plasma Pretreatment in Plant Material Drying



Ivan A. Shorstkii 

Kuban State Technological University , Krasnodar, Russia

Received: 11.02.2022

Revised: 15.03.2022

Accepted: 05.04.2022

Ivan A. Shorstkii: [i-shorstky@mail.ru](mailto:i-shorstky@mail.ru),  
<https://orcid.org/0000-0001-5804-7950>

© I.A. Shorstkii, 2022



### Abstract.

Efficient production requires reliable scientific foundations for new energy-saving technologies and drying processes that are able to transform plant materials into functional products. Mathematical modeling and control can provide efficient drying of cold plasma pretreated plant materials and predict its results.

The present research featured raw potatoes and apples that underwent an electrophysical treatment by atmospheric pressure plasma in an air gas medium. The Luikov drying model served as the main model of heat and mass transfer as a system of coupled differential equations of humidity and temperature potentials. The mathematical modeling procedure and the program code were implemented in the MathCAD software.

The cold plasma pretreatment proved to decrease the drying time. A greater disintegration index resulted in a shorter total drying time. The mathematical modelling of the heat and mass transfer processes almost coincided with the experimental results. The analysis of kinetic transfer coefficients of heat, moisture, and pressure potentials made it possible to develop a control parameter of the drying process of plant materials entitled as the disintegration index.

The proposed mathematical model explained the emerging effects, while the refined kinetic coefficients supported by experimental data clarified the processes in the drying material.

**Keywords.** Drying, heat and mass transfer, drying process control, electrophysical treatment, cold plasma, disintegration index, numerical modeling

**Funding.** The reported research was funded by the Russian Science Foundation (RSF)  No. 21-79-00112, <https://rscf.ru/en/project/21-79-00112>

**For citation:** Shorstkii IA. Cold Plasma Pretreatment in Plant Material Drying. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(3):613–622. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2391>

### Введение

Глобальная конкуренция, необходимость обеспечения безопасности производства пищевых продуктов с высокой пищевой ценностью и снижение удельной энергоёмкости технологий способствуют развитию перспективных технологий управления технологическими процессами [1, 2]. Комплексное решение этих проблем перспективно для пищевых систем.

Альтернативные «зеленые» технологии активно внедряются в процессы производства разнообразных продуктов [3, 4]. Например, технология обработки импульсным электрическим полем, которая успешно применяется при переработке картофеля, производстве соков и подготовке к процессам сушки [5–7]. Наряду с этим такие технологические процессы с применением электрических полей, как электропорация, электрогидродинамическая сушка и электроосмос начинают внедряться в пищевой промышленности [8–10].

В данной работе рассматривается «зеленая» технология обработки низкотемпературной плазмой в качестве предварительной подготовки растительных материалов для управления процессами сушки. Ряд ученых отметил возможность применения низкотемпературной плазмы для ускорения процессов сушки [8, 9]. N. N. Misra и др. обрабатывали специи перца чили потоком низкотемпературной плазмы с частотой 20 кГц и мощностью 750 Вт [10]. Было установлено, что длительность сушки при такой обработке снижается на 12,6 % по сравнению с контрольным образцом. E. Vorobiev и N. Lebovka исследовали эффект обработки низкотемпературной плазмой семян кукурузы при мощности 500 Вт и длительностью 50 с [8]. Результаты показали, что обработка может снизить длительность сушки растительного материала.

В процессе сушки растительных материалов, кроме энергетических затрат, важными являются факторы,

затрагивающие безопасность и качество продукта, которые являются функцией состояния (температура, влажность и состав) материала [11]. В связи с этим управление процессом сушки для ограничения перегрева материала или неконтролируемой усадки являются важными задачами производства.

С точки зрения термодинамики процесса возникающий интенсивный массоперенос в предварительно обработанных низкотемпературной плазмой биоматериалах вызван формированием большого количества древовидных микроканалов, расположенных в толщине биоматериала преимущественно вдоль силовых линий напряженности электрического поля [11]. Основным барьером для массопереноса влаги из структуры капиллярно-пористых коллоидных тел в процессе сушки является сопротивление клеточных мембран. С помощью плазмолиза, в процессе которого происходит анатомическое разрушение клеточных мембран из-за температурного воздействия, возможно ускорение процесса сушки [12]. Предварительная обработка низкотемпературной плазмой может положительно сказаться на динамике массообмена в биоматериалах за счет изменения капиллярно-пористой структуры, присутствия высвободившейся жидкой фазы на поверхности материала в начальный момент времени, увеличения суммарной диффузии и изменения некоторых термодинамических параметров объекта сушки (теплоемкости, теплопроводности и др.) [12–15]. Знания о механизме тепло- и массопереноса процесса сушки для предварительно обработанного низкотемпературной плазмой растительного материала являются необходимым инструментом при построении основ для разработки передовых «зеленых» технологий в пищевой, химической и других областях промышленности.

Целью данного исследования являлось численное моделирование процессов сушки растительных материалов, обработанных низкотемпературной плазмой, на основе модели Лыкова с определением управляющего фактора обработки.

#### Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали яблоки сорта Гренни Смит и картофель сорта Боровичок. Размеры нарезок составляли 45 мм в диаметре с толщиной 5 мм. Начальная влажность объектов исследования составляла  $78,2 \pm 1,3$  и  $83 \pm 1$  % для картофеля и яблок соответственно. Влажность измеряли с помощью анализатора влажности (HC103, Mettler Toledo). Сушку образцов картофеля и яблок проводили в соответствии с данными работ [15, 16] в сушильном шкафу Binder FP 240 (Квакенбрюк, Германия) при температуре 60 °С и объемной скорости потока воздуха  $4,8 \text{ м}^3/\text{ч}$  в течение 8 ч.

**Обработка низкотемпературной плазмой.** Обработку низкотемпературной плазмой атмосферного

давления в воздушной газовой среде проводили с использованием технологической установки на базе высоковольтного усилителя Matsusada 20-B-20 (Matsusada Precision Inc, Япония). Установка обеспечивает формирование устойчивого микроплазменного разряда с помощью источника термоэлектронной эмиссии. Параметры импульса: длительность импульса – 40 мс, частота следования импульсов – 100 Гц, амплитуда импульсов – 60000 В/м. Измерение высоковольтного сигнала осуществляли с помощью осциллографа Tektronix TDS 220 через высоковольтный делитель (X1000, Tektronix). Ячейка для обработки растительных материалов представляет собой систему из плоского анода, на котором располагают исследуемый материал, и катода с термоэлектронной эмиссией, который установлен на шасси для осуществления сканирующего принципа обработки. Эксперименты проводились с применением величины удельной энергии 1 кДж/кг и напряженности поля 60000 В/м.

**Определение индекса дезинтеграции.** При обработке растительных материалов активно используется показатель эффективности электрофизической обработки – индекс дезинтеграции [17]. Данный индекс количественно характеризует степень анатомически разрушенных растительных клеток в процессе обработки низкотемпературной плазмой. Сущность метода заключается в измерении величины электропроводности растительного материала до и после обработки [17]. Величину электропроводности определяли с использованием прецизионного LCR метра 1920 Quadtech (IET LABS, Нью-Йорк, США) на базовых узловых частотах: 10 и 100 Гц и 1, 10 и 100 кГц. При работе с листовыми растительными материалами использовали 2-пиновую насадку, а при работе с растительными материалами толщиной 5 мм – ячейку из плоскопараллельных электродов с набором 4-пиновых коннекторов (1700-03 Kelvin Leads).

Величину индекса дезинтеграции определили по формуле:

$$Z = (\sigma - \sigma_i) / (\sigma_d - \sigma_i) \quad (1)$$

где  $\sigma$  – электропроводность образца после обработки;  $\sigma_i$  – электропроводность образца до обработки (значение близко к нулю);  $\sigma_d$  – электропроводность максимально разрушенных клеток образцов (замороженных при  $-20$  °С).

**Модель сушки Лыкова.** Академиком Лыковым на базе термодинамики необратимых процессов заложены основы теплопереноса и сформулирована система связанных дифференциальных уравнений в частных производных двух уравнений для передачи тепла и массы. Модель Лыкова успешно использовалась для моделирования процессов

переноса температуры и влажности в капиллярно-пористых материалах [18, 19].

Подробная информация о модели с использованием системы уравнений с учетом потенциала давления приведена в работе [20] и численно решена в работе [21]. В данной работе используется система уравнений с потенциалом температуры  $T$  и влажности  $M$  с допущениями в соответствии с работами [17, 21]:

$$\rho_0 c_q \frac{\partial T}{\partial t} = (k_q + \epsilon \lambda \delta' \rho_0 D) \nabla^2 T. \quad (2)$$

$$c_m \frac{\partial M}{\partial t} = \delta' D \nabla^2 T + D c_m \nabla^2 M \quad (3)$$

где  $T$  – потенциал температуры, К;  $M$  – потенциал влажности, °М;  $\epsilon$  – отношение коэффициента диффузии пара к коэффициенту диффузии полной влажности;  $\lambda$  – скрытая теплота парообразования, кДж/кг;  $c_m$  – удельная влагоемкость объекта сушки, кг влаги/(кг сухого тела·°М);  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $c_q$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $k_q$  – коэффициент теплопроводности, Дж/(м·К·с);  $\rho_0$  – плотность сухого тела, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta' = \frac{\delta'}{c_m}$  – термоградиентный коэффициент, 1/К.

Первая часть уравнения (2) после знака равно описывает теплоперенос Фурье, а вторая часть – термодиффузионный эффект Дюфора. В уравнении (3) эффект Соре представлен в первой части правой стороны уравнения, а вторая часть описывает массовый поток от диффузии жидкой фазы.

Определение потенциала влажности  $M$  осуществляли с использованием преобразования Лыкова с использованием экспериментальных данных влажности по материалу  $M_t$  через следующее выражение:

$$M_t = c_m M \quad (4)$$

где  $M_t$  – влажность материала в пересчете на сухое вещество;  $c_m$  – удельная влагоемкость объекта сушки, кг влаги/(кг сухого тела·°М). Величина  $c_m$

определяется экспериментальным путем с использованием эталонной шкалы или может быть принята из справочных данных термодинамических характеристик [22–24].

**Граничные и начальные условия.** Набор граничных условий Неймана для системы дифференциальных уравнений (2)–(3) может быть задан из работы [20]. Начальная температура окружающей среды составляла 60 °С для всех образцов, а начальная влажность картофеля и яблок – 85 и 87 % соответственно.

$$M = M_a \quad \text{Г1} \quad (5)$$

$$c_m \rho_0 D \frac{\partial M}{\partial n} + j_m + \frac{D}{c_m} \rho_0 \delta \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha_m \rho_0 c_{ma} (M_{ai} - M_a) = 0 \quad \text{Г2} \quad (6)$$

$$T = T_a \quad \text{Г3} \quad (7)$$

$$k_q \frac{\partial T}{\partial n} + j_q + \alpha_q (T - T_a) + \alpha_m \lambda \rho_0 (1 - \epsilon) c_{ma} (M_{ai} - M_a) = 0 \quad \text{Г4} \quad (8)$$

где Г1, Г2, Г3 и Г4 составляют полную пограничную поверхность.

В уравнениях (6) и (8)  $\alpha_m$  – конвективный коэффициент массоотдачи, кг/(м<sup>2</sup>с);  $\alpha_q$  – конвективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>К). Индекс «а» означает окружающий. В уравнении (6)  $c_m \rho_0 D \frac{\partial M}{\partial n}$  представляет собой поток влажности, проходящего от центра образца к его поверхности,  $\frac{D}{c_m} \rho_0 \delta \frac{\partial T}{\partial n}$  и  $\alpha_m \rho_0 c_{ma} (M_{ai} - M_a)$  описывают количество влаги, отводимой от поверхности.

Выражение  $k_q \frac{\partial T}{\partial n}$  уравнения (8) представляет собой количество тепла, передаваемого материалу, выражение  $\alpha_q (T - T_a)$  определяет тепло, подносимое к поверхности, а последний член  $\alpha_m \lambda \rho_0 (1 - \epsilon) c_{ma} (M_{ai} - M_a)$  описывает количество влаги, отводимой от поверхности материала.

На основе литературных источников в таблице 1 представлены данные термодинамических харак-

Таблица 1. Термодинамические характеристики объектов сушки

Table 1. Thermodynamics of drying material

Параметры	Единица измерения	Значение	
		Картофель	Яблоко
Плотность сухого тела, $\rho_0$	кг/м <sup>3</sup>	1031	1610
Удельная теплоемкость, $c_q$	Дж/(кг·К)	3494	3950
Коэффициент теплопроводности $k_q$	Вт/(м·К)	0,480	0,570
Удельная влагоемкость, $c_m$	кг влаги/(кг сухого тела·°М)	0,003	0,003
Термоградиентный коэффициент, $\delta$	1/К	0,02	0,02
Отношение коэффициента диффузии пара к коэффициенту диффузии полной влажности, $\epsilon$	–	0,3	0,3
Скрытая теплота парообразования, $\lambda$	Дж/кг	2,25×10 <sup>6</sup>	2,25×10 <sup>6</sup>

теристик объектов сушки. Значение коэффициента конвективной теплопередачи составило 24 Вт/(м<sup>2</sup>·К), а коэффициент конвективной массопередачи  $\alpha_m$  составил 10<sup>-5</sup> м/с [24, 25]. Начальная температура всех образцов была 20 °С.

Переход дифференциальных уравнений к безразмерному виду осуществляли в соответствии со следующими выражениями:

$$\Theta = \frac{T - T_a}{T_0 - T_a}; \Psi = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}; \tau = \frac{k_q t}{\rho_0 c_q l^2}; \quad (9)$$

$$\nabla^* = l\nabla; n^* = \frac{n}{l}$$

где  $M_e$  – потенциал влажности в равновесии с  $M_a$ . Если  $c_{ma} = 1$ , тогда  $M_e = M_a$ ;  $l$  – это характерный размер тела для теплопередачи и диффузии влаги в продукте.

Получаем запись системы дифференциальных уравнений в безразмерном виде:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = (1 + FeLu)(\nabla^*)^2 \Theta + (\epsilon KoLu)(\nabla^*)^2 \Psi \quad (2a)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = PnLu(\nabla^*)^2 \Theta + Lu(\nabla^*)^2 \Psi \quad (3a)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial n^*} + Pn \frac{\partial \Theta}{\partial n^*} + Bi_m \Psi = 0 \quad \Gamma 2a \quad (6a)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial n^*} + Bi_q \Theta + Bi_m Lu Ko (1 - \epsilon) \Psi = 0 \quad \Gamma 4a \quad (8a)$$

где  $Lu = \frac{\rho_0 c_q D}{k_q}$  – число Лыкова,  $Ko = \frac{\lambda c_m (M_0 - M_e)}{c_q (T_0 - T_e)}$  – число Косовича,  $Pn = \frac{\delta (T_0 - T_a)}{c_m (M_0 - M_e)}$  – число Поснова;  $Fe = \epsilon Ko Pn$  – число Федорова;  $Bi_q = \frac{\alpha_q l}{k_q}$  – число Био для теплопереноса,  $Bi_m = \frac{\alpha_m l \rho_0 c_{ma}}{D \rho_0 c_m}$  – число Био для массопереноса.

**Формулировка конечного элемента.** Управляющие дифференциальные уравнения (2a)–(3a) являются асимметричными, что усложняет их численное решение. Для формирования симметричной системы примем условия, что величины  $\epsilon$  и  $\delta$  постоянны. Умножив уравнение (2a) на  $Pn$ , а выражение (3a) на  $\epsilon Ko$  и преобразовав систему уравнений в уравнения конечного элемента с использованием метода взвешенных остатков Галеркина в матричной форме, получим:

$$\begin{bmatrix} C_T & 0 \\ 0 & C_M \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{T} \\ \dot{M} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T \\ M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_T \\ F_M \end{pmatrix} = 0 \quad (10)$$

где коэффициенты  $C_T = Pn$ ,  $C_M = \epsilon Ko$ ,  $K_{11} = (1 + FeLu) \cdot Pn$ ,  $K_{12} = K_{21} = FeLu$ ,  $K_{22} = \epsilon Ko Lu$ ,  $F_T$  и  $F_M$  соответствуют членам температуры и влажности в уравнениях (2a)–(3a). Матрица (10) симметрична и может быть численно решена. Выражение (10) соответствует принципам симметрии Онзагера ( $K_{12} = K_{21}$ ).

**Решение системы дифференциальных уравнений теплопереноса.** В целях создания эффективного вычислительного метода решения системы уравнений (2a)–(8a) предложено использование конечно-разностного метода в соответствии с методологией, описанной ранее [21]. Определенный с помощью численного метода потенциал влажности сравнивался с данными эксперимента. Отклонение значений рассчитывалось по формуле:

$$J = \sum_{n=0}^{15} \left( \frac{M_{p_n} - M_{exp_n}}{M_{p_n}} \right)^2 \quad (11)$$

где  $n$  – номер экспериментальной экстраполяционной точки.

**Кинетические коэффициенты.** Для анализа влияния обработки низкотемпературной плазмы на процесс сушки была поставлена обратная задача для определения кинетических коэффициентов  $K$  и  $C$  уравнения (10). Вычисление вектора весовых коэффициентов  $Z(K, C)$  проводилось в виде минимизации квадрата функции невязок пробной функции  $M(K, C)$  от экспериментальной кривой потенциала влажности:

$$Z(K, C) = \sum_{n=0}^{15} (M(K, C)_n - \text{intrepr}(S, X, Y, x)_n)^2 \quad (12)$$

## Результаты и их обсуждение

**Индекс дезинтеграции.** При оценке индекса дезинтеграции  $Z$ , используя выражение (1) после обработки низкотемпературной плазмой, величина индекса резко возрастает с увеличением количества ее направленных разрядов (рис. 1). Рост величины индекса дезинтеграции связан с ростом количества формируемых сквозных каналов и количеством разрушенных мембран растительных клеток. Для образца картофеля и яблока максимальное значение индекса  $Z$  зафиксировано при 1500 имп/см<sup>2</sup>. После достижения определенного уровня индекса  $Z$  количество разрушенных клеток не увеличивается. Данный факт связан с точечным характером обработки, ограничивающим полное разрушение клеточной структуры. При обработке импульсным электрическим полем рядом исследователей был установлен аналогичный факт. R. Ostermeier и др. связывают ограничения роста индекса дезинтеграции с возникновением обратного эффекта процесса электропорации из-за сверхинтенсивной обработки [26]. Схожая зависимость величины индекса дезинтеграции для материалов картофеля и яблока была получена другими авторами при обработке импульсным электрическим полем [27, 28].

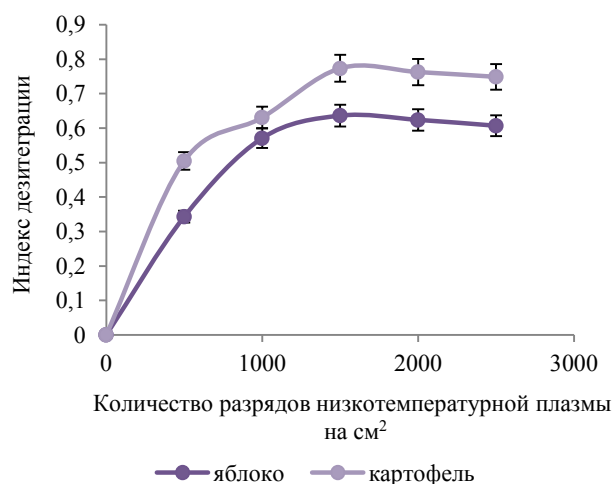


Рисунок 1. Зависимость индекса дезинтеграции от плотности количества разрядов низкотемпературной плазмы на 1 см<sup>2</sup>

Figure 1. Effect of the density of low-temperature plasma discharges per 1 cm<sup>2</sup> on the disintegration index

Полученные данные индекса  $Z$  (рис. 1) были использованы для выбора необходимых значений удельных энергий для достижения трех различных уровней  $Z$ . Таким образом, у картофеля и яблока были выбраны три уровня индекса  $Z$  (0,3, 0,45 и 0,6) для дальнейшего анализа факторов управления процессом сушки. Данные уровни были выбраны для удобства анализа с учетом достигнутого максимального значения индекса  $Z = 0,6$  для яблока. Картофель обрабатывали при удельных энергозатратах 0,5, 1,2 и 1,8 кДж/кг, яблоко – при 0,35, 1 и 1,8 кДж/кг.

**Экспериментальные результаты сушки.** Кривые сушки образцов картофеля и яблока с наличием обработки низкотемпературной плазмой и без представлены на рисунке 2. Кривые свидетельствуют о том, что процесс сушки протекает в условиях доминирующего диффузионного переноса. Предварительная обработка низкотемпературной плазмой позволила снизить длительность сушки до достижения  $M_t = 0,1$ . При удельной энергии 1,8 кДж/кг длительность сушки удалось снизить на 25 и 28 % для картофеля и яблока соответственно. В опубликованных ранее работах сообщалось, что энергетические затраты на обработку составляют менее 1 % от общих энергетических затрат процесса сушки [15, 16]. Качественные характеристики продукции сохраняются на высоком уровне.

**Численное моделирование.** Рассчитанный потенциал влажности с использованием математического аппарата для образцов необработанного картофеля и яблока показан на рисунке 3. Численные результаты прогнозируемого потенциала влажности сравнивались с экспериментальными дан-

ными через уравнение (12). Отклонения расчетной влажности от соответствующих экспериментальных данных показаны на рисунке 3. Прогнозируемое значение потенциала влажности коррелирует с экспериментальными результатами для всех видов образцов. Относительное отклонение по потенциалу влажности составило менее 3 % для всех расчетных точек.

Для образцов, предварительно обработанных низкотемпературной плазмой при различной интенсивности обработки, применялась та же процедура численного моделирования, что и для необработанных образцов. Диапазон отклонений для всех проанализированных данных составлял от 1,2 до 4 %. Это подтверждает целесообразность использования модели Лыкова в качестве математического инструмента для прогнозирования кривых объектов сушки при постоянной температуре.

Определенный с помощью математического аппарата потенциал влажности для растительных материалов (рис. 3) был использован для нахождения заданных значений кинетических коэффициентов из уравнения (10). Аргумент матрицы  $K$  на основе входных данных таблицы 1 для образцов картофеля и яблока после процедуры минимизации отклонения был определен как:

$$K_{\text{карт}} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 22.3 & 86.9 \\ 86.9 & 342.1 \end{bmatrix}$$

$$K_{\text{ябл}} = \begin{bmatrix} 51.4 & 201.1 \\ 201.1 & 791.1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Зависимость величины  $Z$  от кинетического коэффициента  $K$  представлена на рисунке 4.

Первичный анализ полученных зависимостей кинетических коэффициентов от индекса  $Z$  демонстрирует растущий тренд. Величина коэффициента  $K_{12}$  демонстрирует рост с увеличением интенсивности обработки. Это можно объяснить корреляцией между коэффициентом диффузии  $D$  и удельной влагоемкостью  $c_m$ . Основные кинетические коэффициенты  $K_{11}$  и  $K_{22}$  демонстрируют схожее поведение для картофеля и яблока, обработанных низкотемпературной плазмой. В работе [21] было отмечено, что параметры  $\epsilon$ ,  $D$  и  $c_m$  оказывают наибольшее влияние на эффективность процесса сушки (массообмена). Большие значения параметров  $\epsilon$  и  $D$  и малые значения  $c_m$  позволяют интенсифицировать процесс сушки без использования высоких температур.

Для решения задачи управления сушкой было принято условие, что значения других кинетических коэффициентов из уравнения (12) являются постоянными в рассматриваемом диапазоне. Параметр  $D$  влияет на кинетические коэффициенты  $K_{11}$ ,  $K_{12}$ ,  $K_{21}$  и  $K_{22}$ , параметр  $\epsilon$  – на  $K_{11}$  и  $K_{12}$ , параметр  $c_m$  – на  $K_{21}$  и  $K_{22}$ .

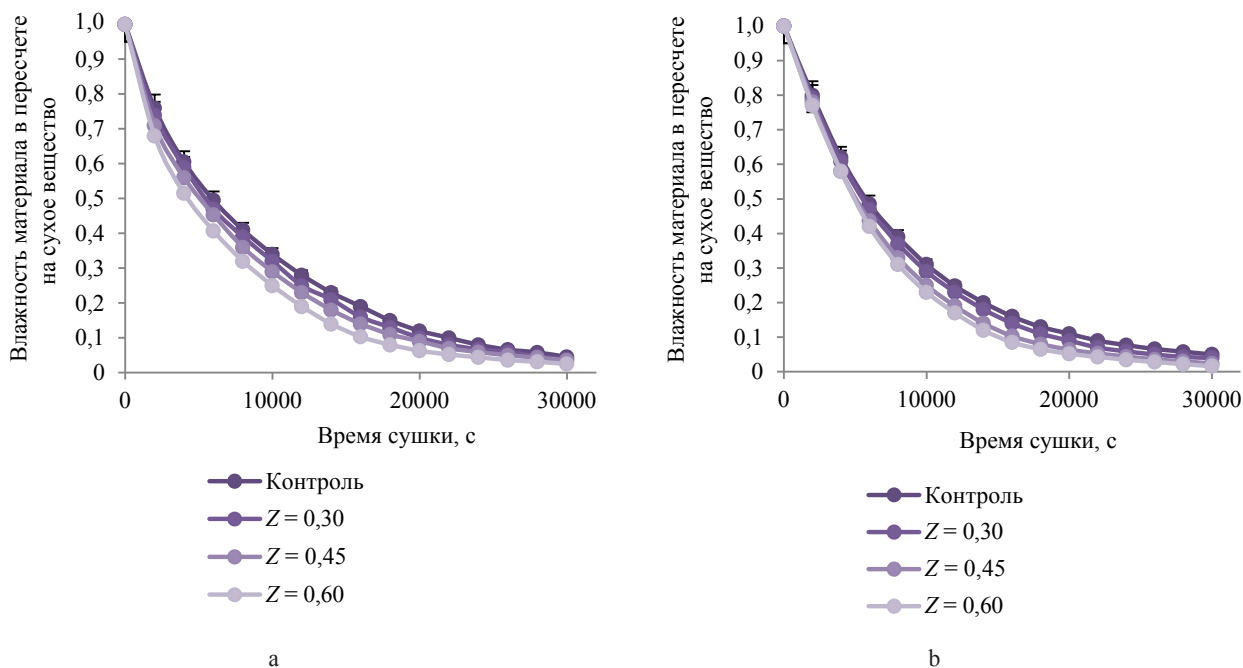


Рисунок 2. Кривые сушки картофеля (а) и яблока (б) при различных уровнях индекса дезинтеграции клеток  
 Figure 2. Drying curves for potatoes (a) and apples (b) at cell disintegration indexes

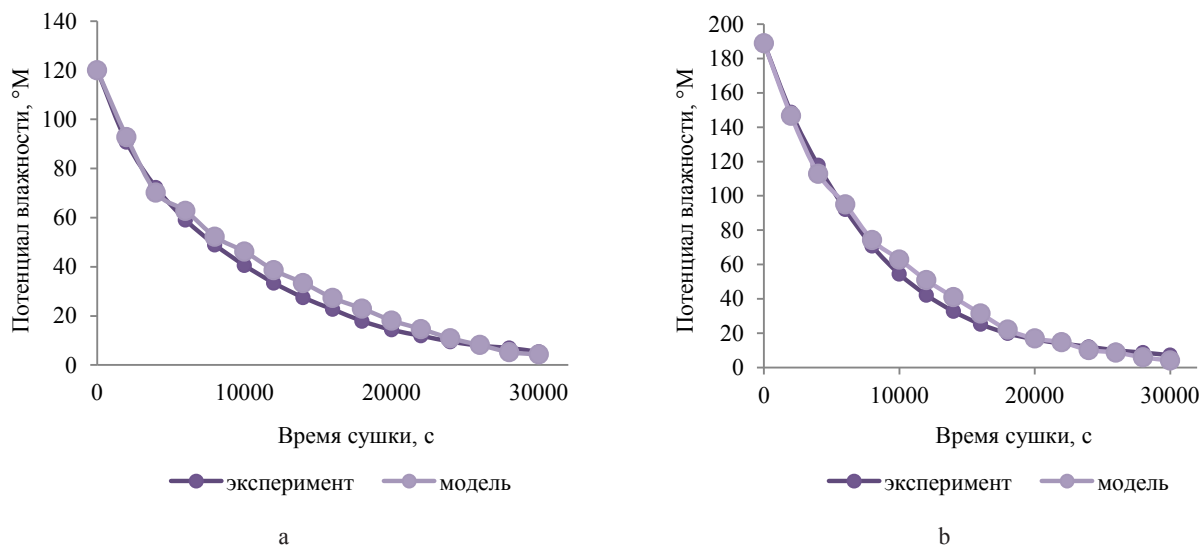


Рисунок 3. Сравнение данных процесса сушки эксперимента с моделью для контрольных образцов картофеля (а) и яблока (б)

Figure 3. Drying model for potatoes (a) and apples (b): experiment vs. control

Таким образом, для анализа влияния обработки низкотемпературной плазмой на процесс сушки необходимо определить взаимосвязь между основными кинетическими коэффициентами и индексом дезинтеграции. Как видно из уравнения (12), коэффициент диффузии присутствует в каждом

кинетическом коэффициенте. В соответствии с работами по предварительной электрофизической обработке при более простой оценке основной акцент направлен на изменение коэффициента диффузии. Примем в данной работе аналогичную гипотезу и свяжем коэффициент диффузии с индексом

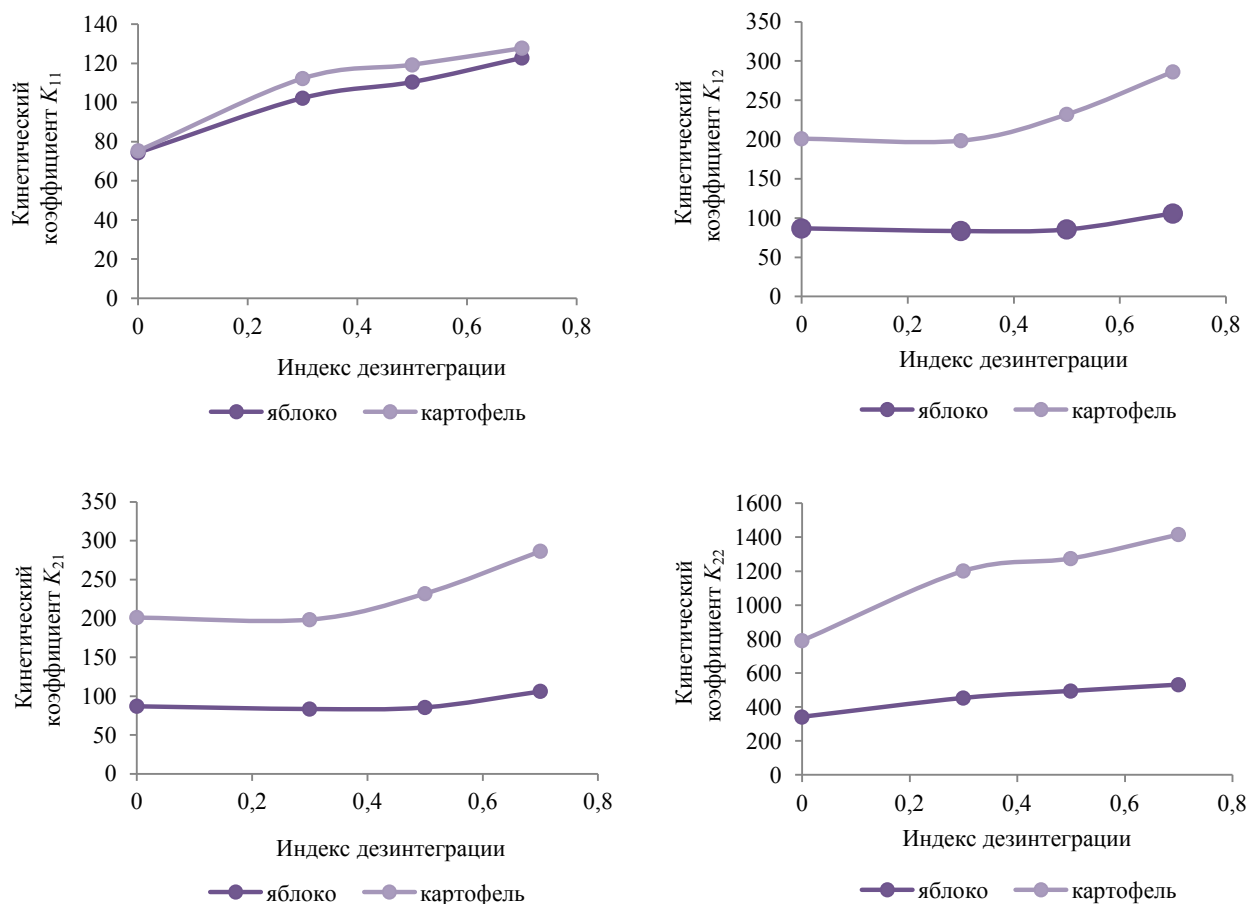


Рисунок 4. Зависимости кинетических коэффициентов от величины индекса дезинтеграции Z для картофеля и яблока

Figure 4. Effect of disintegration index Z on the kinetic coefficients: potatoes and apples

дезинтеграции через выражение и введем упрощенную запись  $Sh = 1 + Z$ :

$$K_{обр} = (1 + Z) \cdot K_0 = Sh \cdot K_0 \quad (14)$$

Индексы «обр» и «0» в уравнении (14) означают обработанный и начальный. Проведенная проверка изменения кинетических коэффициентов из уравнения (13), в соответствии с полученным экспериментальным путем индексом дезинтеграции, показала высокую схожесть  $R^2 = 0,985$ . Следовательно, коэффициент  $Sh$  можно внедрить в систему дифференциальных уравнений при использовании электрофизических методов предварительной обработки материалов, таких как обработка импульсным электрическим полем или низкотемпературной плазмой. Однако дальнейшие более детальные и с расширенным кругом объектов исследования необходимы для подтверждения правомерности использования данного коэффициента для управления процессом сушки растительных материалов.

### Выводы

Разработанный математический аппарат и программный код на основе дифференциальных уравнений термодинамических потенциалов влажности и температуры Лыкова способны описывать экспериментальные кривые сушки предварительно обработанных низкотемпературной плазмой растительных материалов. Предложенные модель и методология, с их высокой точностью (невязка менее 4 %), могут быть использованы для анализа, моделирования и управления процессом сушки пищевых и сельскохозяйственных продуктов. Проведенная оценка эффективности разрушения анатомической целостности растительных клеток посредством измерения индекса дезинтеграции коррелирует с кинетическими коэффициентами модели Лыкова. Эти выражения позволяют прогнозировать ход переноса потенциала влажности и управлять процессом сушки предварительно обработанных материалов с помощью низкотемпературной плазмы при различной интенсивности обработки.



### Конфликт интересов

Автор заявляет, что материалы статьи не были опубликованы ранее и не отправлены в другие журналы. В работе не проводились испытания над животными.

### Conflict of interest

The author declares that this material has not already been published or submitted elsewhere. The experimental research involved no animal tests.

### References/Список литературы

1. Bassey EJ, Cheng J-H, Sun D-W. Novel nonthermal and thermal pretreatments for enhancing drying performance and improving quality of fruits and vegetables. *Trends in Food Science and Technology*. 2021;112:137–148. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.045>
2. Kumar M, Dahuja A, Tiwari S, Punia S, Tak Y, Amarowicz R, *et al.* Recent trends in extraction of plant bioactives using green technologies: A review. *Food Chemistry*. 2021;353. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129431>
3. Lammerskitten A, Shorstkii I, Parniakov O, Mykhailik V, Toepfl S, Rybak K, *et al.* The effect of different methods of mango drying assisted by a pulsed electric field on chemical and physical properties. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020;44(12). <https://doi.org/10.1111/jfpp.14973>
4. Armenta S, Garrigues S, Esteve-Turrillas FA, de la Guardia M. Green extraction techniques in green analytical chemistry. *TrAC – Trends in Analytical Chemistry*. 2019;116:248–253. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.03.016>
5. Fauster T, Schlossnikl D, Rath F, Ostermeier R, Teufel F, Toepfl S, *et al.* Impact of pulsed electric field (PEF) pretreatment on process performance of industrial French fries production. *Journal of Food Engineering*. 2018;235:16–22. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.04.023>
6. Ostermeier R, Hill K, Dingis A, Töpfl S, Jäger H. Influence of pulsed electric field (PEF) and ultrasound treatment on the frying behavior and quality of potato chips. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2021;67. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102553>
7. Arab Shirazi SH, Pedram Nia A, Saeidi Asl MR, Naghipour F, Tavakolipour H. Antioxidant activity of aqueous and alcoholic extracts of *Salvia leriifolia* L. and *Linum usitatissimum* L. subjected to a pulsed electric field. *Foods and Raw Materials*. 2020;8(1):186–195. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2020-1-186-195>
8. Vorobiev E, Lebovka N. Fundamentals of Electroporation, theory and mathematical models for simulation of PEE processing. In: Vorobiev E, Lebovka N, editors. *Processing of foods and biomass feedstocks by pulsed electric energy*. Cham: Springer; 2020. pp. 27–49. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-40917-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-40917-3_2)
9. Zipaev DV, Tulina AA, Kozhukhov AN. The use of capillary electrophoresis in the evaluation of food and beverages. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2020;82(1):82–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-1-82-87>
10. Misra NN, Martynenko A, Chemat F, Paniwnyk L, Barba FJ, Jambrak AR. Thermodynamics, transport phenomena, and electrochemistry of external field-assisted nonthermal food technologies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2018;58(11):1832–1863. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1287660>
11. Shorstkiy IA. Pulsed electric field treatment of biomaterials in preparation for drying. Krasnodar: Izdatel'skiy Dom-Yug; 2020. 172 p. (In Russ.). [Шорсткий И. А. Применение обработки импульсным электрическим полем биоматериалов при подготовке к сушке. Краснодар: Издательский Дом-Юг, 2020. 172 с.]
12. Bao T, Hao X, Shishir MRI, Karim N, Chen W. Cold plasma: An emerging pretreatment technology for the drying of jujube slices. *Food Chemistry*. 2021;337. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127783>
13. Farias TRB, Rodrigues S, Fernandes FAN. Effect of dielectric barrier discharge plasma excitation frequency on the enzymatic activity, antioxidant capacity and phenolic content of apple cubes and apple juice. *Food Research International*. 2020;136. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109617>
14. Karim N, Shishir MRI, Bao T, Chen W. Effect of cold plasma pretreated hot-air drying on the physicochemical characteristics, nutritional values and antioxidant activity of shiitake mushroom. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021;101(15):6271–6280. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11296>
15. Shorstkii I. Application of cold filamentary microplasma pretreatment assisted by thermionic emission for potato drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2020;66. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102540>
16. Khudyakov D, Sosnin M, Shorstkii I, Okpala COR. Cold filamentary microplasma pretreatment combined with infrared dryer: Effects on drying efficiency and quality attributes of apple slices. *Journal of Food Engineering*. 2022;329. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111049>
17. Shorstkii IA, Sosnin MD. Cell membranes of plant materials anatomical integrity changes under the influence of filamentary microplasma treatment assisted by thermionic emission. *Advances in Applied Physics*. 2021;9(3):235–244. (In Russ.). <https://doi.org/10.51368/2307-4469-2021-9-3-235-244>

18. Koukouch A, Bakhattar I, Asbik M, Idlimam A, Zeghmati B, Aharoune A. Analytical solution of coupled heat and mass transfer equations during convective drying of biomass: experimental validation. *Heat and Mass Transfer*. 2020;56(6):1971–1983. <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02817-w>
19. Vargas-González S, Núñez-Gómez KS, López-Sánchez E, Tejero-Andrade JM, Ruiz-López II, García-Alvarado MA. Thermodynamic and mathematical analysis of modified Luikov's equations for simultaneous heat and mass transfer. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021;120. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.105003>
20. Lykov AV. *Theory of Drying*. Moscow: Ehnergiya; 1968. 472 p. (In Russ.). [Лыков А. В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.]
21. Shorstkii IA, Kosachev VS, Koshevoi EP. Numerical modeling of the process of drying biomaterials after pulsed electric field treatment using a system of temperature, moisture, and pressure equations. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020;93(5):1285–1295. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02233-1>
22. Nikitina LM. *Thermodynamic parameters and mass transfer coefficients in moist materials*. Moscow: Energiya; 1968. 500 p. [Никитина Л. М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах. М.: Энергия, 1968. 500 с.]
23. Krokida MK, Zogzas NP, Maroulis ZB. Heat transfer coefficient in food processing: Compilation of literature data. *International Journal of Food Properties*. 2002;5(2):435–450. <https://doi.org/10.1081/JFP-120005796>
24. Berk Z. Physical properties of food materials. In: Berk Z, editor. *Food process engineering and technology*. Academic Press; 2009. pp. 7–25. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373660-4.00001-6>
25. Mohsenin NN. *Thermal properties of foods and agricultural materials*. New York: Gordon and Breach; 1980. 408 p.
26. Ostermeier R, Giersemehl P, Siemer C, Töpfl S, Jäger H. Influence of pulsed electric field (PEF) pre-treatment on the convective drying kinetics of onions. *Journal of Food Engineering*. 2018;237:110–117. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.010>
27. Liu C, Grimi N, Lebovka N, Vorobiev E. Effects of pulsed electric fields treatment on vacuum drying of potato tissue. *LWT*. 2018;95:289–294. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.090>
28. Lammerskitten A, Mykhailyk V, Wiktor A, Toepfl S, Nowacka M, Bialik M, *et al*. Impact of pulsed electric fields on physical properties of freeze-dried apple tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2019;57. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2019.102211>