*Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET* ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
**DOI**: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-219-225 Оригинальная статья/Research article
**УДК** 664.854:621.365.5. Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

# Формирование математической модели процесса сушки яблок

Ольга К. Безотосова [1] e-mail@m.ru введите здесь orcid
Марина А. Беляева [1] belyaevamar@mail.ru 0000-0001-5259-8698
1 Российского экономического университета им. Г.В.Плеханова, Стремянный переулок, 36 г. Москва, 109992 Россия

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы совершенствования процесса сушки яблок как одного из наиболее распространённых способов консервирования плодоовощного сырья, обеспечивающего сохранение пищевой ценности продукта, расширение сроков хранения и удобство транспортировки. Обоснована актуальность применения электрофизических методов нагрева – сверхвысокочастотного (СВЧ), инфракрасного (ИК) и конвективного, а также их комбинаций – в сравнении с традиционными способами сушки. Приведён обзор работ отечественных и зарубежных учёных в области тепло- и массообмена и электрофизической обработки растительного сырья. Цель работы – оптимизация процесса сушки яблок с минимизацией энергозатрат и максимизацией качественных показателей готового продукта. Для достижения поставленной цели предложены конструктивные проектные решения и оптимальное аппаратурное оформление процесса, разработан план эксперимента в виде матрицы из шести базовых факторов на четырёх уровнях варьирования: расстояние от объекта до излучателей, толщина образца, начальная температура камеры и образца, начальная масса сырья и продолжительность сушки. В качестве функций оптимизации приняты продолжительность сушки, удельные энергозатраты, органолептическая оценка по пятибалльной шкале и потери массы продукта. Экспериментальные исследования проведены на лабораторной многофункциональной печи рабочим объёмом 24 л с фиксацией изменения массы образца в режиме реального времени. Математическая обработка результатов выполнена методом наименьших квадратов с проверкой адекватности по критерию значимости при 5%-ном уровне и построением обобщённой мультипликативной зависимости по формуле М.М. Протодьяконова. Установлено, что комбинированные режимы тепловой обработки обеспечивают наилучшее соотношение энергозатрат, продолжительности процесса и качественных показателей готовой продукции, соответствующих требованиям ГОСТ 32896–2014. Предложенное аппаратурное оформление и выявленные оптимальные режимы способствуют повышению производительности при одновременной загрузке сырья и получении качественного продукта.

**Ключевые слова:** яблоки, оптимизация, сушка, аппаратурное оформление, план эксперимента.

# Formation of a mathematical model of the apple drying process

Olga K. Bezotosova [1] e-mail@m.ru введите здесь orcid
Marina A. Belyaeva [1] belyaevamar@mail.ru 0000-0001-5259-8698
1 Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny lane, 36, Moscow, 109992 Russia

**Abstract.** The article addresses the improvement of the apple drying process as one of the most widespread methods of preserving fruit and vegetable raw materials, ensuring retention of nutritional value, extended shelf life and convenient transportation. The relevance of applying electrophysical heating methods – microwave (MW), infrared (IR) and convective, as well as their combinations – is substantiated in comparison with traditional drying techniques. A review of studies by Russian and foreign scientists in the field of heat and mass transfer and electrophysical processing of plant raw materials is presented. The aim of the work is to optimize the apple drying process by minimizing energy consumption and maximizing the quality indicators of the finished product. To achieve this goal, design solutions and optimal hardware configuration of the process are proposed, and an experimental plan is developed in the form of a matrix of six basic factors at four levels of variation: distance from the object to the emitters, sample thickness, initial chamber and sample temperature, initial raw material mass and drying duration. The optimization functions include drying time, specific energy consumption, organoleptic assessment on a five-point scale and product mass loss. Experimental studies were carried out on a laboratory multifunctional oven with a 24 L working chamber with real-time recording of sample mass changes. Mathematical processing of the results was performed by the least squares method with adequacy verification using a significance criterion at the 5% level and construction of a generalized multiplicative dependence according to the M.M. Protodyakonov formula. It was established that combined heat treatment modes provide the best ratio of energy consumption, process duration and quality indicators of the finished product, meeting the requirements of GOST 32896–2014. The proposed hardware design and identified optimal modes contribute to increased productivity with simultaneous raw material loading and high-quality product output.

**Keywords:** apples, optimization, drying, hardware design, experiment plan.

## Введение

Сушёное яблоко – сухофрукт, яблоки культурных и дикорастущих сортов, высушенные под воздействием солнечных лучей (естественная сушка) или в сушильных установках, в которых используются различные виды нагрева. Высушенные яблоки имеют эластичную консистенцию, не ломаются, не слипаются и не дают сока.

Сушёные яблоки имеют широкое применение: можно употреблять в сухом виде, добавлять в компоты, кисели, мюсли, выпечку или использовать в качестве начинки для пирогов и пирожков.

Для цитирования
Безотосова О.К., Беляева М.А. Формирование математической модели процесса сушки яблок // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 219–225. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-219-225

For citation
Bezotosova O.K., Belyaeva M.A. Formation of a mathematical model of the apple drying process. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 219–225. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-219-225

© 2026, Безотосова О.К. и др. / Bezotosova O.K. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

По калорийности сушеные яблоки практически в десять раз превышают свежий фрукт – 250 ккал, повышение пищевой ценности происходит из-за концентрации сахара. В 100 г сухофруктов содержится углеводов – 59 г; белков – 2,5 г; жиров – 0,1 г; сахара – 56 г; крахмала – 3,5 г; органических кислот – 2,5 г; пищевых волокон – 15г. Сушеные яблоки практически в максимальной степени сохраняют минеральные вещества, и витамины, содержащиеся в свежих плодах, исключение составляет аскорбиновая кислота, немного снижаются в процессе обработки. Среди витаминов, которыми богаты сухофрукты из яблок, выделяют А – 3 мкг; РР – 1,2 мг; Е – 1 мг; аскорбиновая кислота – 2 мг; рибофлавин – 0,04 мг; тиамин – 0,02 мг; бета-каротин – 0,02 мг.

Яблоки богаты железом, фосфором, калием, натрием, кальцием, поэтому сушеные яблоки включают в рацион питания как взрослого человека, так и маленьких детей.

Сушкой плодов и овощей занимаются как российские, так и зарубежные учёные разных стран, разрабатываются технологии сушки, изучаются влияние различных способов сушки на качество продуктов и совершенствуются оборудование для процесса сушки.

В развитие теории и техники электрофизического воздействия на сырье растительного и животного происхождения внесли вклад такие учёные как И.А. Рогов, А.С. Гинзбург, А.В. Лыков.

Сушкой плодоовощного сырья занимаются как отечественные, так и зарубежные ученые. Agoua R., Ashtiani S., Barsotti L., Basset A., Kaur S., Kumar K., Liu Z., Nowak D., Salehi F., Tappi S., Toepfl S., Wang D., Wang J., Wiktor A., Zhu L. и др. внесли вклад в развитие техники и технологии переработки плодоовощного сырья с применением электрофизической и микроплазменной обработки [5, 6].

Для сушки плодовоовощной продукции используются различные методы, отличающиеся друг от друга классификационными признаками. Известны традиционные способы сушки пищевых продуктов, такие как естественная конвекционная сушка и искусственная конвекционная сушка. В настоящее время в мировой практике используются следующие способы искусственной сушки плодоовощного сырья: конвективный, сублимационный, СВЧ, кондуктивный, инфракрасный и другие. Наиболее распространенными являются методы, при которых высушиваемый продукт непосредственно контактирует с теплоносителем (нагретым воздухом или перегретым паром) и контактный метод способ (высушиваемый объект соприкасается с нагретым теплоносителем) [1, 2, 4, 7, 8].

Известны труды российских ученых: Н. Каухчешвили автор низкотемпературной вакуумной технологии сушки овощей, фруктов, ягод, В. Бочаров изучил влияние формы нарезки сырья и предварительной тепловой обработки на продолжительность сушки, качество готовой продукции, подтвердил целесообразность комбинации конвективного и микроволнового способов сушки.

Процесс сушки яблок позволяет значительно улучшить вкусовые и пищевые свойства данного продукта, повысить его качество, сделать более легкоусвояемым для употребления, а также увеличить сроки хранения продукта и облегчить его транспортировку [1].

Сушка – процесс принудительного удаления жидкости (чаще всего влаги/воды, реже иных жидкостей, например, летучих органических растворителей) из веществ и материалов.

На сегодняшний день имеются разные способы сушки фруктов и овощей, в том числе и яблок, как в домашних условиях, так и в промышленном масштабе, в малом и среднем бизнесе, а также имеется достаточно большой арсенал и выбор сушильного оборудования, однако встает вопрос о совершенствовании процесса сушки яблок и определении оптимальных температурных режимов, при которых используются энергосберегающие технологии, разрабатываются режимы, при которых минимизируем затраты и улучшаем качественные показатели.

Сушка яблок в промышленных условиях – метод консервации фруктов, который позволяет сохранить полезные свойства, вкус и текстуру яблок. Традиционный способ сушки на открытом воздухе (на солнце или в тени) не подходит для переработки больших объёмов яблок.

Для промышленной сушки яблок используют специализированные сушильные камеры или установки с вентиляторами и системами контроля температуры и влажности:

– конвекционная – яблоки помещаются в специальную камеру, где на них подаётся горячий воздух.

– инфракрасная – фрукты помещаются на специальный ленточный конвейер, который проходит через зону с инфракрасными лампами.

– вакуумная – яблоки помещаются в камеру с низким давлением, где происходит испарение воды.

– микроволновая – яблоки помещаются в специальные устройства, которые генерируют микроволновое излучение, что приводит к испарению влаги изнутри яблок.

Для промышленной сушки яблок используют сушилки: конвейерного типа – продукты размещаются на ленте, по мере движения ленты проходят через несколько нагревательных тунелей, при сушке используют лотки – фрукты размещаются на лотках, горячий воздух

подаётся сверху и снизу лотков, чтобы обеспечить равномерную просушку каждого фрукта, вакуумные – под воздействием мощного вакуумного насоса и системы клапанов фрукты теряют влагу за короткое время, распылительные – обработанная жидкая фруктовая мякоть закачивается в сопло, которое распыляет её в тонкие капли, которые попадают в плотный поток горячего воздуха в сушильной камере, где быстро теряют влагу. Технология промышленной сушки яблок включает стадии подготовку сырья – яблоки моют, очищают от кожуры и сердцевины, нарезают на тонкие ломтики или дольки (оптимальная нарезка – 5–6 мм), предварительная обработка – перед сушкой яблоки могут обрабатывать горячим воздухом, парообработкой, кратковременным кипячением в слабом растворе консерванта, сушка – яблоки раскладывают на специальных лотках, отправляют в сушильную камеру. Температура и время сушки зависят от вида оборудования, но, как правило, процесс длится не менее чем 12 часов при температуре 50–60 градусов и охлаждение – после окончания сушки сушёные яблоки охлаждают.

Процесс промышленной сушки яблок регламентируется межгосударственным стандартом ГОСТ 32896–2014 – «Фрукты сушёные. Общие технические условия».

На основе проведенного анализа нормативно-технической документации, существующего сушильного оборудования, патентного поиска и анализа современных технологий сушки были поставлены цели и задачи исследований.

**Цель работы** – оптимизировать процесс сушки с минимизацией энергозатрат и максимизацией качественных показателей. Для этого решались следующие задачи: проведение экспериментальных исследований по сушке яблок, выявление факторов, влияющих на качественные показатели, а также выявление наиболее приемлемого способа для сушки яблок.

## Материалы и методы

Нами были проведены экспериментальные исследования по влиянию различных видов нагрева на процесс сушки яблок: за факторы были приняты различная толщина нарезки яблок, расстояние до излучателей, начальная масса и температура образца исследования, начальная температура в рабочей камеры сушильной установки.

Экспериментальные исследования проводились с целью определения оптимального режима сушки при разных способах подвода энергии. Работа проводилась с использованием лабораторной многофункциональной печи с камерой рабочий объем 24 л, в которой предусмотрены различные режимы нагрева представлена на (рисунок 1).

Через отверстие в верхней стенке печи проходит термостойкая нить, на которой подвешивается чаша с высушиваемым образцом. Верхний конец нити крепится к нижнему подвесу электронных цифровых весов для фиксации изменения влажности в процессе тепловой обработки 5.

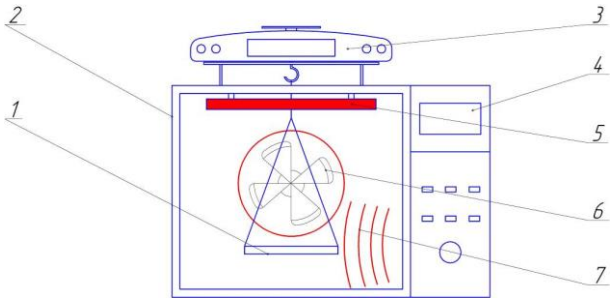



Рисунок 1. Схема лабораторного экспериментального стенда: 1 – чаша с высушиваемым образцом, 2 – корпус рабочей камеры, 3 – электронные весы для фиксации изменения массы в процессе сушки, 4 – индикатор температуры, 5 – инфракрасные нагревательные элементы, 6 – калорифер для конвективного нагрева, 7 – магнетрон для реализации СВЧ-нагрева, 8 – рабочая камера, 9 – таймер времени

Figure 1. The scheme of the laboratory experimental stand: 1 – a bowl with a dried sample, 2 – the body of the working chamber, 3 – electronic scales for recording mass changes during the drying process, 4 – a temperature indicator, 5 – infrared heating elements, 6 – a heater for convective heating, 7 – a magnetron for microwave heating, 8 – a working camera, 9 – time timer

Для экспериментов использовались яблоки свежие разных помологических сортов яблок. Сорта, которые различаются по ряду биологических признаков, в том числе вкусу, химическому составу, срокам хранения, способности к транспортировке. Условно помологические сорта делят на летние, осенние и зимние по срокам созревания, культивируемые в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ Р 34314–2017. «Яблоки свежие, реализуемые в розничной торговле. Технические условия». Актуализация стандарта была проведена 01.01.2024.

В промышленных сушильных аппаратах температуру рабочей камеры варьируют в диапазоне от 35 до 45 °С. Также можно использовать метод изменения температурного режима, многостадийный.

Можно сушить яблоки при температуре около 75 градусов для образования «корочки» на поверхности, а затем снижать температуру на 45–50 °С или наоборот, сначала использовать небольшую температуру, затем увеличивать, варьируя также продолжительность сушки, в зависимости от того, что должно получиться на выходе.

Сушка образцов проводилась с использованием различных способов: сверхвысокочастотный, инфракрасный, конвективный и комбинациями данных способов.

План эксперимента представлял матрицу, состоящую из шести базовых факторов и четырех уровнях, каждый показатель имел многократное измерение: изменение массы образца за определенные промежутки времени, а также температура внутри рабочей камеры. Образцы яблок были осеннего сорта.

Таблица 1.

Факторы и уровни варьирования (инфракрасный нагрев)

Table 1.

Factors and levels of variation (infrared heating)

| Факторы \| Index | Уровень \| Level | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Расстояние от объекта исследования до излучателей h, см<br>Distance from test object to emitters h, cm | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Толщина образца, см \| Sample thickness, cm | 5 | 8 | 12 | 15 |
| Начальная температура в камере T, °C \| Initial chamber temperature T, °C | 80 | 85 | 90 | 95 |
| Начальная температура образца, °C \| Initial sample temperature, °C | 4 | 6 | 12 | 18 |
| Начальная масса образца \| Initial sample mass | 30 | 35 | 40 | 45 |
| Продолжительность сушки, минуты \| Drying time, minutes | 6 | 8 | 12 | 16 |
| Энергозатраты, кВт-час. кг рубли \| Energy consumption, kWh, kg, rubles | | | | |
| Оценка качественных показателей, Балл \| Quality indicator rating, points | | | | |
| Потери массы, % \| Mass loss, % | | | | |

За функции для оптимизации приняты следующие параметры: $Y_1$ – продолжительность сушки, мин; $Y_2$ – энергетические затраты на сушку, кВт· ч/кг; $Y_3$ – органолептическая оценка, балл; $Y_4$ – потери в массе продукта, %.

В качестве объекта исследования использовались свежие яблоки, соответствующие указанным нормам: плоды были здоровыми, целыми, свежими, чистыми и без повреждений сельскохозяйственными вредителями.

Таблица 2.

Влияние различных способов нагрева на качественные показатели сушенных яблок

Table 2.

The influence of various heating methods on the quality indicators of dried apples

| Высота слайса, мм<br>Slice height, mm | Начальная температура, °C<br>Initial temperature, °C | Начальная масса сырья, г<br>Initial raw material weight, g | Температура после тепловой обработки, °C<br>Temperature after heat treatment, °C | Масса после тепловой обработки, г<br>Weight after heat treatment, g | Режим тепловой обработки \| Heat treatment mode | Потери массы<br>Weight loss | Время обработки, секунды<br>Processing time, seconds | Органолептическая оценка (пятибалльная шкала)<br>Organoleptic assessment (five-point scale) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 23,1 | 17,78 | 62,9 | 16,05 | СВЧ | 1,73 г<br>9,73% | 20 | Полупрозрачное, запах печеного яблока, мягкое, не деформируется при сжатии; Внешний вид – 4, запах – 4, цвет – 3 \| Translucent, baked apple scent, soft, does not deform when squeezed; Appearance – 4, Odor – 4, Color – 3 |
| 12 | 22,9 | 8,72 | 36 | 8,48 | ИК | 0,24 г<br>2,75% | 180 | Темное, мало отличается по виду от необработанного, нет запаха печеного яблока, есть корочка, твердое; Внешний вид – 3, запах – 3, цвет – 3 \| Dark, little different in appearance from untreated, no baked apple scent, crust present, firm; Appearance – 3, Odor – 3, Color – 3 |
| 13 | 22,8 | 14,37 | 32,8 | 13,77 | Конвекция | 0,6 г<br>4,175% | 180 | Аналогично второму объекту \| Similar to the second item |
| 11 | 22,6 | 9,33 | 66,4 | 6,38 | СВЧ + Конвекция | 2,95 г<br>3,16% | 60 | Полупрозрачное, есть корочка, запах печеного яблока, мягкое; Цвет – 4, запах – 4, внешний вид – 3 \| Translucent, crust present, baked apple scent, soft; Color – 4, Odor – 4, Appearance – 3 |
| 14 | 22,7 | 15,25 | 73,9 | 12,33 | СВЧ + ИК | 2,92 г<br>19,15% | 60 | Полупрозрачное, очень мягкое, склонно к деформации при сжатии; Внешний вид – 3, запах – 4, цвет – 4 \| Translucent, very soft, prone to deformation when squeezed; Appearance – 3, Odor – 4, Color – 4 |

Основным стандартом РФ, регулирующим требования к сушёным яблокам, является ГОСТ 32896–2014 «Фрукты сушёные». Согласно стандарту, внешний вид и форма сушёных яблок должны соответствовать следующим характеристикам: целые сушёные плоды с косточкой или без неё; половинки сушёных плодов правильной круглой или овальной формы со слегка завернутыми краями; неповреждённая кожица; допускаются кружки (боковые срезы), полноценные по мякоти; плоды не должны слипаться при сжатии; допускается комкование полуфабриката, устраняемое лёгким механическим воздействием; вкус и запах должны быть свойственными данному виду фруктов, без посторонних примесей; лёгкий запах сернистого ангидрида допускается для обработанных продуктов; окраска – от светло-жёлтой до светло-кремовой, допускается розоватый оттенок, характерный для некоторых сортов.

В таблице 2 приведены режимы, в которых использованы разные виды нагрева. По результатам эксперимента представленных в таблице 2, установлено, что цвет обработанных образцов соответствовал требованиям стандарта: образцы № 1, 4 и 5 имели светло-жёлтый оттенок, а образцы № 2 и 3 – близкий к кремовому. Образцы не слипались при сжатии, за исключением образца № 5, склонного к пластическим деформациям. Запах всех образцов соответствовал нормам.

Таблица 3.

Матрица планирования эксперимента

Table 3.

Experiment planning matrix

| n | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 5 | 80 | 4 | 30 | 6 |
| 2 | 10 | 8 | 85 | 6 | 35 | 8 |
| 3 | 15 | 12 | 90 | 12 | 40 | 12 |
| 4 | 20 | 15 | 95 | 18 | 45 | 16 |
| 5 | 5 | 15 | 95 | 6 | 35 | 12 |
| 6 | 10 | 8 | 90 | 12 | 45 | 16 |
| 7 | 15 | 15 | 85 | 18 | 30 | 6 |
| 8 | 20 | 5 | 80 | 4 | 40 | 8 |
| 9 | 5 | 8 | 85 | 6 | 40 | 8 |
| 10 | 10 | 12 | 90 | 12 | 45 | 12 |
| 11 | 15 | 5 | 95 | 18 | 35 | 16 |
| 12 | 20 | 15 | 80 | 4 | 30 | 6 |
| 13 | 5 | 12 | 95 | 12 | 35 | 8 |
| 14 | 10 | 15 | 80 | 18 | 40 | 12 |
| 15 | 15 | 12 | 90 | 6 | 45 | 16 |
| 16 | 20 | 15 | 95 | 4 | 40 | 12 |
| 17 | 5 | 15 | 85 | 18 | 30 | 16 |
| 18 | 10 | 12 | 80 | 12 | 35 | 6 |
| 19 | 15 | 5 | 90 | 6 | 45 | 8 |
| 20 | 20 | 8 | 95 | 4 | 40 | 12 |

Матрица планирования эксперимента может быть дополнена разными факторами, функции – результаты каждого опыта можно получить либо расчетным путем, либо в процессе эксперимента получить с использованием соответствующих современных контрольно-измерительных приборов.

## Заключение

Математическая обработка результатов эксперимента следующая: структура матрицы планирования такова, что при проведении всех экспериментов каждый уровень любого фактора встречается один раз для каждого уровня всех остальных факторов. Для этого каждый уровень каждого фактора в эксперименте задается столько раз, сколько принято уровней. Этим достигается усреднение действия любого фактора Эмпирические формулы для описания частных зависимостей качества готовых изделий, энергозатрат, продолжительности процесса сушки и потерь массы в зависимости от параметров ИК – облучения, начальной температуры в камере, начальной толщины образца получены в результате обработки экспериментальных данных на ЭВМ методом наименьших квадратов. Органолептические показатели готовой продукции оценивались по пятибалльной шкале и по пяти показателям (внешний вид, цвет, запах, консистенция, вкус), согласно ГОСТ 16431–70 «Балльный способ выражения показателей качества продукции»). В результате обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов, были разработаны частные зависимости и определены значимости каждой частной функции, насколько каждые варьируемые уровни и диапазон исследуемых факторов–параметров, область ограничений и допустимых значений в которой разработанные модели реально действительны. Для проверки адекватности и обоснованности принятых параметров, проводилась проверка их значимости с определением доверительного интервала на основе коэффициента линейной корреляции:

$$R = \sqrt{1 - \frac{(N-1)\sum_1^N (Y_э - Y_m)^2}{(N-K-1)\sum_1^N \left(Y_э - Y_{„m}\right)^2}}$$

Критерий значимости для 5%-ного уровня:

$$t = \frac{R \cdot \sqrt{N-K-1}}{1-R^2}$$

где N – число описываемых точек; k – число действующих фак торов; YЭ – экспериментальный результат; YCP – среднее экспериментальное значение; YP – расчетный результат.

При N = 4, k = 1 учитывается влияние только одного фактора. При этом Y совпадает с общим средним. Для получения обобщенного уравнения, описывающего процесс тепловой обработки мясных полуфабрикатов при ИК-облучении, использована мультипликативная формула, предложенная М.М. Протодьяконовым:

$$Y_{об} = \frac{\prod_{k=1}^{n} \cdot Y_k}{Y_{-p}^{n-1}}$$

где $Y_{об}$ – обобщенная функция; $Y_i$ – частная функция. Как показал анализ расчетов и органолептическая оценка, прошедших сушку яблоки, с экономических позиций и с органолептической точки зрения наиболее лучшими были режимы, рекомендуемые в опыте 3.

**Литература**

1 Taghinezhad E., Kaveh M., Szumny A. et al. Qualitative, energy and environmental aspects of microwave drying of pre-treated apple slices // Scientific Reports. 2023. V. 13. № 1. P. 16152. doi: 10.1038/s41598-023-43358-6

2 Rasooli Sharabiani V., Kaveh M., Abdi R. et al. Estimation of moisture ratio for apple drying by convective and microwave methods using artificial neural network modeling // Scientific Reports. 2021. V. 11. № 1. P. 9155. doi: 10.1038/s41598-021-88270-z

3 Demiray E., Yazar J.G., Aktok Ö. et al. The effect of drying temperature and thickness on the drying kinetic, antioxidant activity, phenolic compounds, and color values of apple slices // Journal of Food Quality. 2023. V. 2023. P. 7426793. doi: 10.1155/2023/7426793

4 Zhu L., Ji X., Yang H. et al. Heat pump technology in the field of fruit and vegetable drying: A review // Foods. 2025. V. 14. № 15. P. 2569. doi: 10.3390/foods14152569

5 Dehghannya J., Habibi-Ghods M. Microwave drying of food materials: Principles, hybrid techniques, modeling approaches, and emerging innovations // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2025. V. 24. № 6. P. e70312. doi: 10.1111/1541-4337.70312

6 Беляева М.А., Еремин А.Е., Безотосова О.К. Перспективные разработки многофункционального оборудования // Пищевая промышленность. 2022. № 4. С. 59–62. doi: 10.52653/PPI.2022.4.4.010

7 Belyaeva M.A., Gajour A.A., Koroleva E.I. et al. Introduction of innovative ways of drying mushrooms // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. V. 1052. № 1. P. 012038. doi: 10.1088/1755-1315/1052/1/012038

8 Huang X., Li W., Wang Y., Wan F. Mathematical modeling of thin-layer drying kinetics and moisture diffusivity study of apple slices using infrared conveyor-belt dryer // Journal of Food Science. 2024. V. 89. № 3. P. 1658–1671. doi: 10.1111/1750-3841.16967

9 Huang X., Li Y., Zhou X. et al. Prediction of apple slices drying kinetic during infrared-assisted-hot air drying by deep neural networks // Foods. 2022. V. 11. № 21. P. 3486. doi: 10.3390/foods11213486

10 Bai J.W., Zhang L., Aheto J.H. et al. Effects of different pretreatment methods on drying kinetics, three-dimensional deformation, quality characteristics and microstructure of dried apple slices // Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2023. V. 83. P. 103216. doi: 10.1016/j.ifset.2022.103216

11 Adelusi O.A., Aworh O.C., Tarafdar A. et al. Investigation of the effects of infrared and hot air oven drying methods on drying behaviour and colour parameters of red delicious apple slices // Processes. 2023. V. 11. № 10. P. 3027. doi: 10.3390/pr11103027

12 Motevali A., Hashemi S.J., Tabatabaeekoloor R., Salarikia A. Enhancing energy efficiency and retention of bioactive compounds in apple drying: comparative analysis of combined hot air–infrared drying strategies // Applied Sciences. 2023. V. 13. № 13. P. 7612. doi: 10.3390/app13137612

13 Martynenko A., Bashkir I. The effect of material thickness, load density, external airflow, and relative humidity on the drying efficiency and quality of EHD-dried apples // Foods. 2022. V. 11. № 18. P. 2765. doi: 10.3390/foods11182765

14 Zhu R., Jiang S., Li D. et al. Dehydration of apple slices by sequential drying pretreatments and airborne ultrasound-assisted air drying: study on mass transfer, profiles of phenolics and organic acids and PPO activity // Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2022. V. 75. P. 102871. doi: 10.1016/j.ifset.2021.102871

15 Ciurzyńska A., Trusińska M., Rybak K. et al. The influence of pulsed electric field and air temperature on the course of hot-air drying and the bioactive compounds of apple tissue // Molecules. 2023. V. 28. № 7. P. 2970. doi: 10.3390/molecules28072970

16 Kidoń M., Grabowska J. Bioactive compounds, antioxidant activity, and sensory qualities of red-fleshed apples dried by different methods // LWT – Food Science and Technology. 2021. V. 136. P. 110302. doi: 10.1016/j.lwt.2020.110302

17 Antal T. Effect of combined drying on the physical properties and bioactive components of 'Jonathan' apple (Malus domestica L.) // Acta Alimentaria. 2023. V. 52. № 4. P. 538–548. doi: 10.1556/066.2023.00191

18 Kavak Akpinar E., Toraman S. Effect of drying methods on energy and exergy analysis, drying kinetics and quality parameters of apple slices // Heat and Mass Transfer. 2022. V. 58. P. 1437–1454. doi: 10.1007/s00231-022-03212-5

19 Усманова К.А. Исследование современных методик сушки яблок в стационарном и нестационарном режиме в условиях сухого жаркого климата // Universum: технические науки. 2024. Т. 5. № 2 (119). С. 63–64.

20 Байда Б.Ю., Гатицкий Д.В. Исследование характеристик сушки ломтиков яблок при комбинированной сушке с использованием теплового насоса // Материалы пула научно-практических конференций. 2023. С. 167–172.

**References**

1 Taghinezhad E., Kaveh M., Szumny A. et al. Qualitative, energy and environmental aspects of microwave drying of pre-treated apple slices. Scientific Reports. 2023. vol. 13. no. 1. article 16152. doi: 10.1038/s41598-023-43358-6.

2 Rasooli Sharabiani V., Kaveh M., Abdi R. et al. Estimation of moisture ratio for apple drying by convective and microwave methods using artificial neural network modeling. Scientific Reports. 2021. vol. 11. no. 1. article 9155. doi: 10.1038/s41598-021-88270-z.

3 Demiray E., Yazar J.G., Aktok Ö. et al. The effect of drying temperature and thickness on the drying kinetic, antioxidant activity, phenolic compounds, and color values of apple slices. Journal of Food Quality. 2023. vol. 2023. Article 7426793. doi: 10.1155/2023/7426793.

4 Zhu L., Ji X., Yang H. et al. Heat pump technology in the field of fruit and vegetable drying: A review. Foods. 2025. vol. 14. no. 15. article 2569. doi: 10.3390/foods14152569.

5 Dehghannya J., Habibi-Ghods M. Microwave drying of food materials: Principles, hybrid techniques, modeling approaches, and emerging innovations. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2025. vol. 24. no. 6. Article e70312. doi: 10.1111/1541-4337.70312.

6 Belyaeva M.A., Eremin A.E., Bezotosova O.K. Promising Developments of Multifunctional Equipment. Food Industry. 2022. no. 4. pp. 59–62. doi: 10.52653/PPI.2022.4.4.010 (in Russian).

7 Belyaeva M.A., Gajour A.A., Koroleva E.I. et al. Introduction of innovative ways of drying mushrooms. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. vol. 1052. no. 1. article 012038. doi: 10.1088/1755-1315/1052/1/012038.

8 Huang X., Li W., Wang Y., Wan F. Mathematical modeling of thin-layer drying kinetics and moisture diffusivity study of apple slices using infrared conveyor-belt dryer. Journal of Food Science. 2024. vol. 89. no. 3. pp. 1658–1671. doi: 10.1111/1750-3841.16967.

9 Huang X., Li Y., Zhou X. et al. Prediction of apple slices drying kinetic during infrared-assisted-hot air drying by deep neural networks. Foods. 2022. vol. 11. no. 21. article 3486. doi: 10.3390/foods11213486.

10 Bai J.W., Zhang L., Aheto J.H. et al. Effects of different pretreatment methods on drying kinetics, three-dimensional deformation, quality characteristics and microstructure of dried apple slices. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2023. vol. 83. article 103216. doi: 10.1016/j.ifset.2022.103216.

11 Adelusi O.A., Aworh O.C., Tarafdar A. et al. Investigation of the effects of infrared and hot air oven drying methods on drying behaviour and colour parameters of red delicious apple slices. Processes. 2023. vol. 11. no. 10. article 3027. doi: 10.3390/pr11103027.

12 Motevali A., Hashemi S.J., Tabatabaeekoloor R., Salarikia A. Enhancing energy efficiency and retention of bioactive compounds in apple drying: comparative analysis of combined hot air–infrared drying strategies. Applied Sciences. 2023. vol. 13. no. 13. article 7612. doi: 10.3390/app13137612.

13 Martynenko A., Bashkir I. The effect of material thickness, load density, external airflow, and relative humidity on the drying efficiency and quality of EHD-dried apples. Foods. 2022. vol. 11. no. 18. article 2765. doi: 10.3390/foods11182765.

14 Zhu R., Jiang S., Li D. et al. Dehydration of apple slices by sequential drying pretreatments and airborne ultrasound-assisted air drying: study on mass transfer, profiles of phenolics and organic acids and PPO activity. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2022. vol. 75. article 102871. doi: 10.1016/j.ifset.2021.102871.

15 Ciurzyńska A., Trusińska M., Rybak K. et al. The influence of pulsed electric field and air temperature on the course of hot-air drying and the bioactive compounds of apple tissue. Molecules. 2023. vol. 28. no. 7. article 2970. doi: 10.3390/molecules28072970.

16 Kidoń M., Grabowska J. Bioactive compounds, antioxidant activity, and sensory qualities of red-fleshed apples dried by different methods. LWT – Food Science and Technology. 2021. vol. 136. article 110302. doi: 10.1016/j.lwt.2020.110302.

17 Antal T. Effect of combined drying on the physical properties and bioactive components of 'Jonathan' apple (Malus domestica L.). Acta Alimentaria. 2023. vol. 52. no. 4. pp. 538–548. doi: 10.1556/066.2023.00191.

18 Kavak Akpinar E., Toraman S. Effect of drying methods on energy and exergy analysis, drying kinetics and quality parameters of apple slices. Heat and Mass Transfer. 2022. vol. 58. pp. 1437–1454. doi: 10.1007/s00231-022-03212-5.

19 Usmanova K.A. Study of Modern Methods of Drying Apples in Stationary and Non-Stationary Modes in Dry Hot Climates. Universum: Technical Sciences. 2024. vol. 5. no. 2 (119). pp. 63–64. (in Russian).

20 Baida B.Yu., Gatitsky D.V. Study of Drying Characteristics of Apple Slices during Combined Drying Using a Heat Pump. Materials of the Pool of Scientific and Practical Conferences. 2023. pp. 167–172. (in Russian).

**Сведения об авторах**

**Ольга К. Безотосова** аспирант, кафедра пищевых технологий и биоинженерии, Российского экономического университета им. Г.В.Плеханова, Стремянный переулок, 36 г. Москва, 109992 Россия, e-mail@m.ru
https://orcid.org/введите здесь orcid
**Марина А. Беляева** д.т.н., профессор, кафедра пищевых технологий и биоинженерии, Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова, Стремянный переулок, 36 г. Москва, 109992 Россия, belyaevamar@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-5259-8698

**Information about authors**

**Olga K. Bezotosova** graduate student, food technologies and bioengineering department, Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny lane, 36, Moscow, 109992 Russia, e-mail@m.ru
https://orcid.org/введите здесь orcid
**Marina A. Belyaeva** Dr. Sci. (Engin.), professor, food technologies and bioengineering department, Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny lane, 36, Moscow, 109992 Russia, belyaevamar@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-5259-8698

**Вклад авторов**

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

**Contribution**

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

**Поступила** 11/11/2025 **После редакции** 18/01/2026 **Принята в печать** 10/02/2026

**Received** 11/11/2025 **Accepted in revised** 18/01/2026 **Accepted** 10/02/2026