Научные труды Дальрыбвтуза. 2025. Том 74, № 4. С. 89–99.

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Научная статья
УДК 637.344.053.4:664.292.4 DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2025-74-09 EDN: GXJADW

Исследование динамики, научное обоснование гипотезы о механизме удаления влаги и оптимизация режимов микроволновой вакуумной сушки полутвердого сыра

Егор Геннадьевич Тимчук
Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, Россия
timchuk.eg@dgtru.ru; ORCID: 0000-0003-2473-2081

Аннотация. Стратегия повышения качества пищевой продукции в РФ до 2030 года направляет пищевые предприятия к увеличению их конкурентоспособности. Применение воздействия волнами сверхвысокой частоты на полутвердый сыр под вакуумом позволяет изготовить новый конкурентоспособный сушеный продукт с пористой структурой хрупкой консистенцией. В ходе исследования проведен анализ динамики варьирования массовой доли влаги полутвердого сыра в процессе его вакуумно-микроволновой сушки. Под действием магнитного поля сверхвысокой частоты под вакуумом влага из обрабатываемых изделий удаляется с высокой скоростью, разрывая казеиновую матрицу полутвердого сыра и образуя пористую структуру. Выдвинута гипотеза о механизме этого явления, состоящая в накоплении нестабильности «белковой матрицы» казеина сыра под действием микроволн сверхвысокой частоты и давления перегретой жидкости с последующим быстрым образованием пара такой силы, что ведет к разрыву казеиновой «белковой матрицы» с образованием пористой структуры. Определены оптимальные и рациональные параметры вакуумно-микроволновой сушки полутвердого сыра методом ортогонального центрального композиционного планирования эксперимента. В эксперименте варьировалась продолжительность сушки от 8 до 12 мин с интервалом варьирования в 2 мин и доля задействования мощности магнетрона от 30 до 70 % с интервалом варьирования в 20 %. Оптимум как экстремум полученной функциональной зависимости составил следующие значения: продолжительность сушки 10 мин, доля задействования мощности магнетрона 50 %. Рациональные параметры как наиболее близкая область к перегибу поверхности отклика полученной функциональной зависимости варьировались следующим образом: продолжительность сушки 9,5–10,5 мин, доля задействования мощности магнетрона 45–55 %.

Ключевые слова: динамика сушки, механизм вакуумной микроволновой сушки полутвердого сыра, оптимизация режимов сушки

Для цитирования: Тимчук Е. Г. Исследование динамики, научное обоснование гипотезы о механизме удаления влаги и оптимизация режимов микроволновой вакуумной сушки полутвердого сыра // Научные труды Дальрыбвтуза. 2025. Т. 74, № 4. С. 89–99.

© Тимчук Е. Г., 2025

Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2025. Vol. 74, no. 4. P. 89–99.

FOOD SYSTEMS

Original article

Investigation of dynamics, scientific substantiation of the hypothesis about the mechanism of moisture removal and optimization of microwave vacuum drying of semi-hard cheese

Egor G. Timchuk
Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia
timchuk.eg@dgtru.ru, ORCID: 0000-0003-2473-2081

Abstract. The strategy for improving the quality of food products in the Russian Federation until 2030 directs food enterprises to increase their competitiveness. The application of ultrahigh frequency waves to semi-hard cheese under vacuum makes it possible to produce a new competitive dried product with a porous structure and brittle consistency. The study analyzes the dynamics of variation in the mass fraction of moisture of semi-hard cheese during its vacuum-microwave drying. Under the action of an ultrahigh frequency magnetic field under vacuum, moisture is removed from processed products at high speed, tearing the casein matrix of semi-hard cheese and forming a porous structure. A hypothesis has been put forward about the mechanism of this phenomenon, which consists in the accumulation of instability of the «protein matrix» of cheese casein under the action of ultrahigh frequency microwaves and superheated liquid pressure, followed by rapid vapor formation of such force that leads to the rupture of the casein «protein matrix» with the formation of a porous structure. Optimal and rational parameters of vacuum-microwave drying of semi-hard cheese were determined by the method of orthogonal central compositional planning of the experiment. In the experiment, the drying time varied from 8 to 12 minutes with a variation interval of 2 minutes and the proportion of magnetron power from 30 to 70 % with a variation interval of 20 %. The optimum, as the extreme of the obtained functional dependence, was the following values: the drying time was 10 minutes, and the proportion of magnetron power used was 50 %. The rational parameters, as the closest inflection area of the response surface of the obtained functional dependence, varied as follows: the drying time was 9,5–10,5 minutes, the proportion of magnetron power utilization was 45-55 %.

Keywords: dynamics of drying, mechanism of vacuum microwave drying of semi-hard cheese, optimization of drying modes

For citation: Timchuk E. G. Investigation of dynamics, scientific substantiation of the hypothesis about the mechanism of moisture removal and optimization of microwave vacuum drying of semi-hard cheese. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2025;74(4): 89–99. (in Russ.).

Введение

Расширение ассортимента выпускаемой пищевой продукции стимулирует конкурентоспособность пищевых предприятий, что способствует реализации стратегии повышения качества пищевой продукции в РФ до 2030 года [1].

Объединение воздействий, оказываемых на пищевое сырье, основанных на различных физических принципах, позволяет добиться получения новой готовой продукции, способной придать конкурентное преимущество предприятию пищевой промышленности. Так и воздействие волн сверхвысокой частоты на полутвердый сыр под вакуумом позволяет добиться новых его качественных свойств. Но изменения характеристик полутвердого сыра под действием

волн сверхвысокой частоты, находящегося под вакуумом, а также определение оптимальных параметров сушки полутвердого сыра в этих условиях мало изучены или не изучены вовсе.

Вопросами исследования вакуумной сушки пищевой продукции занимались такие отечественные ученые, как Котова Т. И., Румянцев А. А., Ермолаев В. А., Шингисов А. У., Алибеков Р. С., Родионов Ю. В., Борзов С. С., Махамбетов Э. М., Каширин Д. Е., Касьянов Г. И., Морозов С. С. [2, с. 21; 3, с. 33; 4, с. 101; 5, с. 161; 8, с. 21; 9, с. 125; 10, с. 7; 11, с. 415; 12, с. 38; 13, с. 279; 14, с. 172; 15, с. 50; 16, с. 510; 18, с. 72; 19, с. 36; 20, с. 161]. Ими описаны и исследованы процессы сушки растительного сырья, ягод, пчелиного маточного молока, перги, молочных продуктов (мягкого сыра). Но исследования процесса сушки сыра полутвердых сортов не было изучено.

В отдельных случаях отечественными учеными изучалась сушка, комбинирующая вакуум с инфракрасным воздействием, СВЧ, сублимацией: Саерова К. В., Семенов Г. В., Ратникова Л. Б. [6, с. 246; 7, с. 51; 17, с. 97]. Но в данных работах рассматривается сушка продукции из растительного сырья и в малой степени продукция животного происхождения.

Исходя из вышесказанного целью работы являлись функциональные зависимости влажностных характеристик полутвердого сыра в процессе его вакуумно-микроволновой сушки, механизм удаления влаги и оптимальные параметры вакуумно-микроволновой сушки полутвердого сыра.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи:

- анализ характеристик используемой вакуумно-микроволной сушильной установки;
- анализ динамики варьирования массовой доли влаги полутвердого сыра в процессе его вакуумно-микроволновой сушки;
- определение оптимальных параметров вакуумно-микроволновой сушки полутвердого сыра методом ортогонального центрального композиционного планирования эксперимента.

Объектом исследования являлась микроволновая вакуумная сушка полутвердого сыра.

Предметом исследования: динамические характеристики и оптимальные режимы микроволновой вакуумной сушки полутвердого сыра.

Материалы и методы исследования

В качестве сырья использовали сыр полутвердый «Российский» согласно ГОСТ 32260-2013 «Сыры полутвердые. Технические условия». Полутвердый сыр перед сушкой нарезали на кусочки квадратной формы шириной 1,5–2,0 см. В качестве сушильной установки использовали микроволновую вакуумную установку «АЛЬТА-ЛМ 2».

Суммарную органолептическую оценку полученных образцов сушеного сыра проводили с использованием разработанной балльной шкалы на основе требований ГОСТ 32260-2013 «Сыры полутвердые. Технические условия» и классических методических приемов, описанных Сафроновой Т. М. [21, с. 8–48] с учетом коэффициентов весомости частных органолептических показателей. Максимально возможная суммарная органолептическая оценка составляла 20 баллов. Массовую долю влаги определяли экспресс-методом с использованием лабораторных весов и прибора Чижовой.

Результаты и их обсуждение

Сушку полутвердого сыра осуществляли в микроволновой вакуумной установке «АЛЬТА-ЛМ 2», схема представлена на рис. 1.

Рис. 1. Схема и внешний вид микроволновой вакуумной установки «АЛЬТА-ЛМ 2»:
1 – корпус; 2 – сушильная камера; 3 – магнетрон; 4 – вакуумный насос; 5 – многоэтажная сетчатая полка; 6 – двигатель; 7 – укупоривающая крышка; 8 – колесико; 9 – блок управления.
Составлено автором
Fig. 1. Diagram and appearance of the ALTA-LM 2 microwave vacuum unit: 1 – housing;
2 – drying chamber; 3 – magnetron; 4 – vacuum pump; 5 – multi–storey mesh shelf, 6 – motor;
7 – capping lid; 8 – wheel; 9 – control unit. Compiled by the author

Измельченный полутвердый сыр размещали на многоэтажной сетчатой полке 5, закрывали укупоривающую крышку 7 и задавали программу сушки при помощи блока управления 9. После запуска при помощи вакуумного насоса 4 из сушильной камеры 2 удаляется воздух, многоэтажная сетчатая полка начинает вращение при помощи двигателя 6, магнетрон 3 начинает излучать магнитное поле.

Установка позволяет создавать разряжение вплоть до 10±4 мм рт. ст., варьировать температуру от 20 до 100 °С путем изменения доли задействования мощности магнетрона в 2,5 кВт от 10 до 100 %.

Задав разряжение в 20±4 мм рт. ст. и варьируя долю задействования мощности магнетрона от 40 до 80 %, исследовали изменения влажности образцов полутвердого сыра «Российский», результаты представлены на рис. 2.

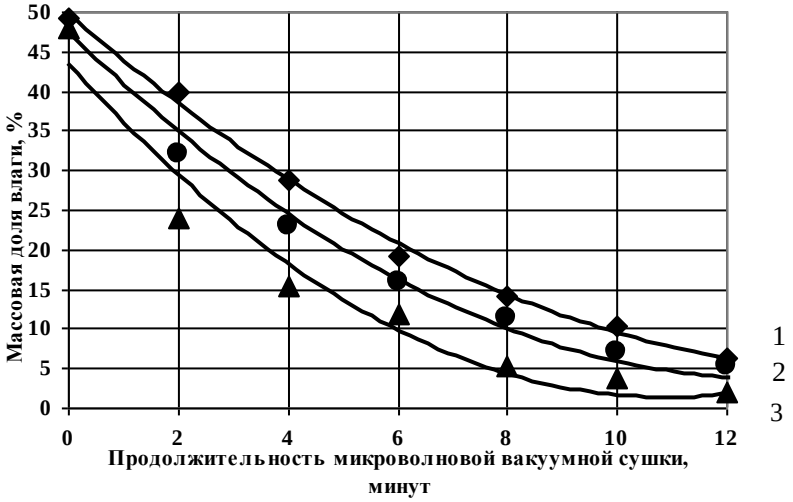

Рис. 2. Изменение массовой доли влаги полутвердого сыра «Российский» в процессе микроволновой вакуумной сушки (доля задействования мощности магнетрона: 1–40 %, 2–60 %, 3–80 %). Составлено автором
Fig. 2. Change in the mass fraction of moisture in semi-hard Russian cheese during microwave vacuum drying (the proportion of magnetron power used: 1–40 %, 2–60 %, 3–80 %). Compiled by the authors

Статистическая обработка полученных данных позволила определить функциональные зависимости содержания влаги в полутвердом сыре «Российский» от продолжительности микроволновой вакуумной сушки, табл. 1.

Таблица 1

Функциональные зависимости содержания влаги в полутвердом сыре «Российский» от продолжительности микроволновой вакуумной сушки

Table 1

Functional dependences of the moisture content in semi-hard cheese «Rosiyskiy» on the duration of microwave vacuum drying

Доля задействования мощности магнетрона, %	Функциональная зависимость	Степень достоверности аппроксимации (R^2)
40	$\omega=0{,}163\tau^2-5{,}479\tau+48{,}713$	0,99
60	$\omega=0{,}262\tau^2-6{,}784\tau+47{,}483$	0,98
80	$\omega=0{,}356\tau^2-7{,}753\tau+43{,}529$	0,95

Анализ результатов, представленных на рис. 2 и табл. 1, показывает, что процесс удаления влаги из сыра «Российский» характеризуется нелинейными зависимостями, что согласуется с классическими данными об удалении влаги из пористых тел [22, с.75]. Изменение скорости удаления влаги из полутвердого сыра «Российский» в процессе его сушки представлено на рис. 3.

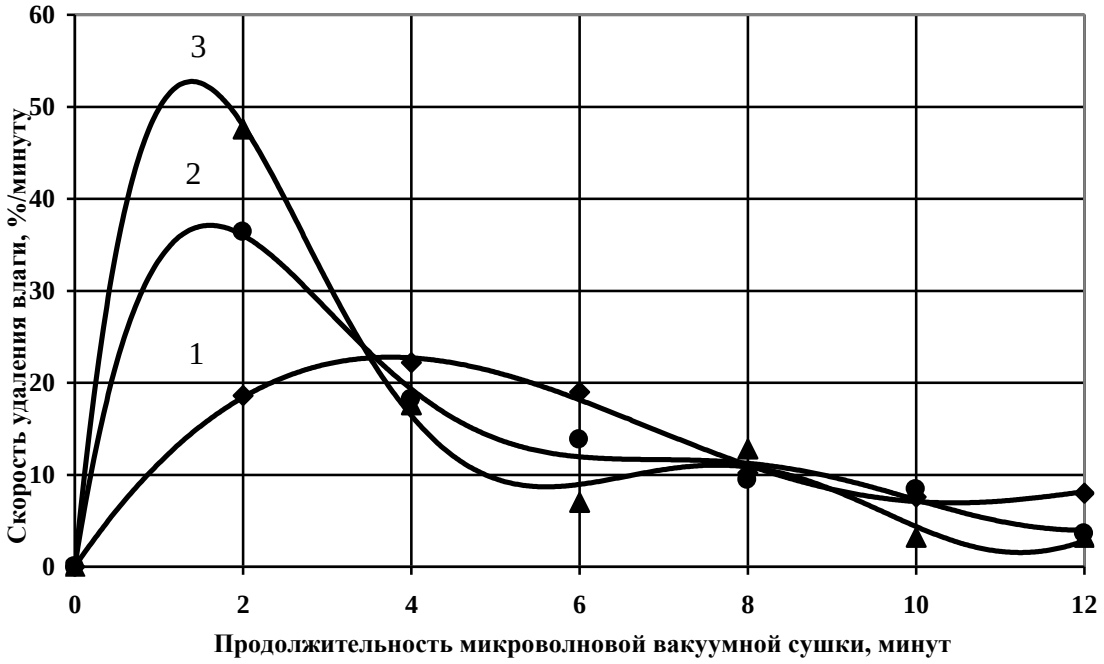

Рис. 3. Изменение скорости удаления влаги из образцов полутвердого сыра «Российский» в процессе микроволновой вакуумной сушки (доля задействования мощности магнетрона: 1 – 40 %, 2 – 60 %, 3 – 80 %). Составлено автором

Fig. 3. Change in the rate of moisture removal from samples of semi-hard Russian cheese during microwave vacuum drying (proportion of magnetron power utilization: 1 – 40 %, 2 – 60 %, 3 – 80 %). Compiled by the author

Как известно, нагревание объектов под действием магнитного поля сверхвысокой частоты происходит за счет реализации механизма релаксации дипольных молекул обрабатываемого изделия. При этом, приняв как аксиому теорию валентных связей, можно прийти к выводу, что в большей степени механизм релаксации происходит с молекулами воды, так как они по своей природе более полярны, чем белковые молекулы казеина сыра. Известно, что полярность воды обусловлена асимметричным распределением электронов между атомами водорода и кислорода. Атом кислорода более электроотрицателен, чем атомы водорода, и притягивает к себе общую электронную пару. В результате на атоме кислорода возникает частичный отрицательный заряд, а на атомах водорода – частичные положительные заряды. Неравномерное распределение зарядов превращает молекулу воды в диполь – систему с двумя выраженными полюсами и дипольным моментом, равным 1,84 Д (дебая).

Белковые молекулы казеина молока представляют собой группы гетерогенных фосфопротеинов, ассоциирующихся в мицеллы в присутствии ионов кальция, фосфатов и цитратов кальция. Молекулы казеина молока одновременно содержат свободные отрицательно заряженные карбоксильные и положительно заряженные аминные группы, из которых первые преобладают, поэтому в растворе казеин молока имеет частично отрицательный заряд. В результате воздействия сычужного фермента после гидролиза казеин молока распадается на 2 фракции: гидрофобный пара-к-казеин и гидрофильный гликомакропептид, последний уходит в сыворотку.

Гидрофобный пара-к-казеин, или казеин сыра, теряет частично отрицательный заряд, приводящий к снижению эффекта электростатического отталкивания между мицеллами, что ведет к их агрегатированию и образованию мозаичной структуры, названной «казеиновой сетью», или «белковой матрицей». Объединившись, мицеллы теряют подвижность, а пустоты «белковой матрицы» заполняются гидрофильными гликомакропептидами – молочной сывороткой и капиллярной водой, образуя гели. Благодаря гелеобразованию белково-молочная система улучшает свою способность сопротивляться сжатию через комплекс таких реологических свойств, как упругость, твердость, пластичность и т.д. Таким образом, казеин сыра следует рассматривать как систему, состоящую из «белковой матрицы», поры которой заполнены гелем. Общий дипольный момент всей системы ориентировочно близок к нулю, но разные ее части имеют дипольный момент, отличный от нуля – полярной части и равный нулю – не полярной части.

Как и в любых влажных пористых телах, скорость удаления влаги в начальные моменты времени сушки ($\tau < 2$ мин) максимальна, так как происходит удаление наиболее легко удаляемой влаги: влаги смачивания и влаги макрокапилляров. С увеличением продолжительности сушки (2–6 мин) скорость удаления влаги падает, так как влага смачивания и влага макрокапилляров уже удалены, а влага микрокапилляров еще не перераспределилась. На 6–8-й мин скорость удаления влаги незначительно возрастает, так как влага микрокапилляров уже удалена, и вся энергия передается на «белковую матрицу» казеина сыра. Элементы «белковой матрицы» вибрируют с таким усилием, что это приводит к разрушению «кальциевых мостиков»: связей между ионами кальция и остатками фосфорной кислоты. Предположительно, «белковая матрица» казеина сыра денатурирует, «размягчается», под действием гравитационных сил она сминается, «матрица» схлопываются, сыр «плавится».

Под действием разряжения температура кипения воды понижается и при реализации СВЧ-сушки возможна реализация множества сценариев, крайними из которых являются:

- при давлении, близком к атмосферному, температура кипения воды составляет около 100 °С, при реализации СВЧ-сушки при температуре 40–50 °С вода постепенно удаляется, белковые молекулы постепенно денатурируют, сыр «плавится», как было описано выше;

- при разряжении температура кипения воды понижается, что связано с реализацией зависимости Клапейрона–Клаузиуса, релаксация молекул воды происходит значительно быстрее, но парообразования не происходит из-за отсутствия центров парообразования, так как «белковая матрица» казеина сыра еще не денатурировала, и ее пористая структура с еще не

разрушенными слабыми связями препятствует образованию пузырьков образования пара (вода переходит в состояние перегретой жидкости). Накапливается нестабильность «белковой матрицы» вследствие вибрации ее частей, вызванной воздействием волн сверхвысокой частоты. В определенный момент «белковая матрица» казеина «не выдерживает» (слабые связи начинают разрушаться) и в какой-то их части (можно предположить, что в их полярной части) создается центр парообразования. Тогда создаваемое паром избыточное давление разрывает казеиновую «белковую матрицу» сыра, образуя пористую структуру сушеного продукта (рис. 4, а);

- при разряжении и высокой температуре, образованной мощным воздействием магнетрона, пористая структура сыра слишком размягчается и начинает под действием гравитационных сил опадать и сливаться с соседними кусочками, образуя сырные конгломераты (рис. 4, б).

По своим органолептическим показателям изготовленные образцы высушенного полутвердого сыра значительно отличались в оценке их консистенции и общей приемлемости. Вкусовые же качества и аромат не отличались. Поэтому с целью определения оптимальных параметров микроволновой вакуумной сушки полутвердого сыра «Российский» построили следующую матрицу планирования эксперимента, табл. 2.

а б

Рис. 4. Внешний вид образцов сушеного полутвердого сыра, изготовленного при различных условиях: а – с образованием пористой структуры; б – с образованием пористой структуры и последующей конгломерацией. Фото автора

Fig. 4. The appearance of samples of dried semi-hard cheese made under various conditions: a – with the formation of a porous structure; б – with the formation of a porous structure and subsequent conglomeration. Photo by the author

В качестве фактора X_1 варьировали продолжительность сушки 8, 10 и 12 мин, в качестве фактора X_2 варьировали долю задействования мощности магнетрона 30, 50 и 70 %. В качестве функции отклика Y оценивали суммарную органолептическую оценку полученных сушеных образцов полутвердого сыра «Российский».

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента микроволновой вакуумной сушки полутвердого сыра «Российский»

Table 2

The matrix of planning the experiment of microwave vacuum drying of semi-hard cheese «Rosiyskiy»

№ опыта	X_0	X_1	X_2	Y_1	Y_2	Y_3	Yср	$S^2(Y_i)$
1	+	–	–	17,4	17,1	17,6	17,4	0,205
2	+	–	0	18,3	18,1	18,3	18,2	0,009
3	+	–	+	17,6	17,5	17,9	17,7	0,029
4	+	0	–	18,1	18,0	18,3	18,1	0,016
5	+	0	0	19,9	19,7	19,8	19,8	0,007
6	+	0	+	18,8	18,7	19,1	18,9	0,029
7	+	+	–	17,7	17,9	18,2	17,9	0,042
8	+	+	0	18,7	18,2	18,3	18,4	0,047
9	+	+	+	18,0	18,2	18,2	18,1	0,009

Статистическая обработка экспериментальных данных позволила построить графическое представление зависимости суммарной органолептической оценки сушеного полутвердого сыра «Российский» от продолжительности сушки и доли задействования мощности магнетрона, рис. 5.

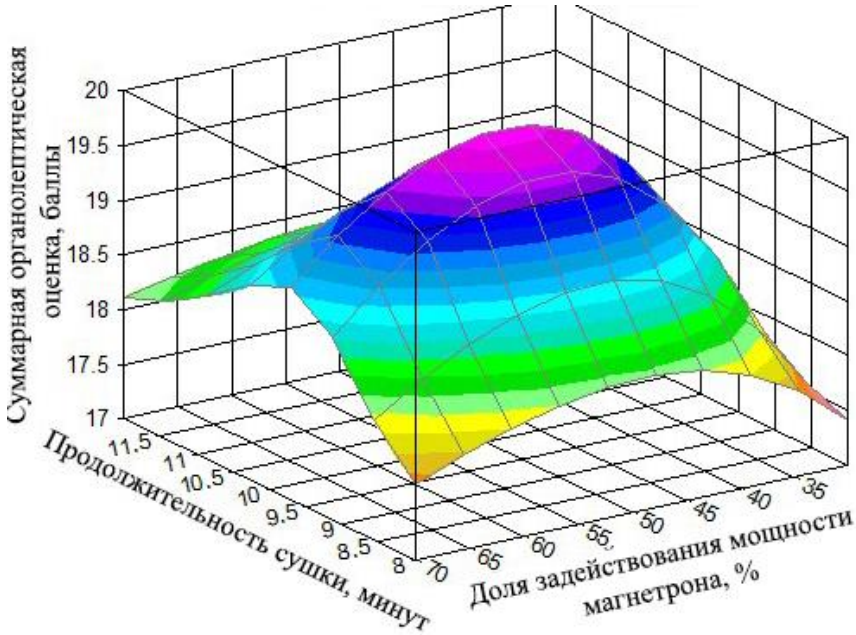

Рис. 5. Графическое представление зависимости суммарной органолептической оценки сушеного полутвердого сыра «Российский» от продолжительности сушки и доли задействования мощности магнетрона. Составлено автором

Fig. 5. Graphical representation of the dependence of the total organoleptic assessment of dried semi-hard cheese «Rosiyskiy» on the duration of drying and the proportion of magnetron power utilization. Compiled by the author

Математическая обработка экспериментальных данных позволила построить математическую модель процесса сушки полутвердого сыра «Российский» в виде уравнения регрессии

$$Y = \frac{16{,}933 - 14{,}975 \ln X_1 + 3{,}346 \ln X_1^2 - 0{,}025 \ln X_2}{1 - 0{,}859 \ln X_1 + 0{,}192 \ln X_1^2 - 0{,}016 \ln X_2 + 0{,}002 \ln X_2^2},$$

где Y – суммарная органолептическая оценка сушеного полутвердого сыра «Российский», баллы;

x_1 – продолжительность сушки, мин;

x_2 – доля задействования мощности магнетрона, %.

Достоверность аппроксимации модели составила 0,99.

Графоматематический анализ экспериментальных данных позволил установить оптимальные и рациональные параметры процесса микроволновой вакуумной сушки полутвердого сыра «Российский».

Оптимальные режимы как экстремум полученной функциональной зависимости составили:

- продолжительность сушки 10 мин;
- доля задействования мощности магнетрона 50 %.

Рациональные режимы как наиболее близкая область к перегибу поверхности отклика полученной функциональной зависимости составили:

- продолжительность сушки 9,5–10,5 мин;
- доля задействования мощности магнетрона 45–55 %.

Заключение

Микроволновая вакуумная сушильная установка «АЛЬТА-ЛМ 2» позволяет сушить пищевую продукцию при температурах от 20 до 100 °С и разряжении вплоть до 10±4 мм рт. ст. и представляет собой устройство, позволяющее изготавливать оригинальную пищевую продукцию с измененными свойствами.

Исследование динамики варьирования влажностных характеристик полутвердого сыра в процессе сушки позволило определить нелинейные функциональные зависимости массовой доли влаги от доли задействования мощности магнетрона сушильной установки и продолжительности сушки. При этом определено, что скорость удаления влаги в начальные моменты времени сушки ($\tau < 2$ мин) превышает ее последующие значения, что согласовывается с известными данными.

Научно обоснована гипотеза удаления влаги в процессе вакуумной микроволновой сушки полутвердого сыра. Она состоит в накоплении нестабильности «белковой матрицы» казеина сыра под действием микроволн сверхвысокой частоты и давления перегретой жидкости с последующим быстрым образованием пара такой силы, что ведет к разрыву казеиновой «белковой матрицы» с образованием пористой структуры.

Определены оптимальные и рациональные параметры вакуумно-микроволновой сушки полутвердого сыра методом ортогонального центрального композиционного планирования эксперимента. Оптимум составил следующие значения: продолжительность сушки 10 мин, доля задействования мощности магнетрона 50 %. Рациональные параметры варьировались следующим образом: продолжительность сушки 9,5–10,5 мин, доля задействования мощности магнетрона 45–55 %. Определенные режимы могут быть использованы при формировании нормативной документации на готовый сушеный продукт из сыра полутвердого «Российский».

Список источников

1. Стратегия повышения качества пищевой продукции РФ до 2030 года [Электронный ресурс]. URL: http://static.government.ru/media/files/9JUDtBOpqmoAatAhvT2wJ8UPT5Wq8qIo.pdf (дата обращения : 15.09.2025).

2. Котова Т. И., Хантургаев А. Г., Ширеторова В. Г., Хантургаева Г. И. Разработка микроволнового вакуумного способа получения порошка из замороженного плодово-ягодного сырья // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 6. С. 21–23.

3. Румянцев А. А. Направления развития энергосбережения при вакуумной сушке растительных материалов // Вестник Международной академии холода. 2024. № 4. С. 32–38.

4. Ермолаев В. А. Одно-, двух- и трехступенчатая вакуумная сушка молочных продуктов // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2010. № 5(209). С. 100–105.

5. Ермолаев В. А. Низкотемпературная вакуумная сушка как способ обезвоживания растительного сырья // Вестник КрасГАУ. 2019. № 1(142). С. 160–166.

6. Саерова К. В., Мухтарова А. Р., Илалова Г. Ф., Шамсутдинова А. И., Галяветдинов Н. Р. // СВЧ-вакуумная сушка льняного волокна // Техника и технологии: пути инновационного развития : сборник научных трудов 7-й Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор А. А. Горохов. 2018. С. 246–249.

7. Семенов Г. В., Ермаков С. А., Краснова И. С. Вакуумная сублимационная сушка пищевых продуктов: температурные границы для рационального использования в промышленном производстве // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2022. № 2–3(386–387). С. 51–57.

8. Шингисов А. У., Алибеков Р. С., Еркебаева С. У., Габрильянц Э. А., Тастемирова У. У. Вакуумная сушка сортов яблок, груши и малины, произрастающих в южных регионах РК // Вестник Алматинского технологического университета. 2022. № 4. С. 19–25.

9. Алибеков Р. С., Шингисов А. У., Еркебаева С. У., Габрильянц Э. А., Майлыбаева Э. У., Тастемирова У. У. Вакуумная сушка сортов черешни лязат, мерей и айгерим, произрастающих в южных регионах РК // Вестник Алматинского технологического университета. 2023. № 3. С. 125–130.

10. Родионов Ю. В., Данилин С. И., Рыбин Г. В., Зорин А. С., Зорина О. А., Талыков В. А. Вакуумная сушка растительных материалов // Наука в центральной России. 2024. № 3(69). С. 7–15.

11. Борзов С.С. Низкотемпературная вакуумная сушка – перспективная технология обработки растительного сырья // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича : сборник статей. Москва, 2024. С. 414–417.

12. Ермолаев В. А. Вакуумная сушка пчелиного маточного молочка // Агропромышленные технологии Центральной России. 2025. № 1(35). С. 38–48.

13. Махамбетов Э.М., Ворошилин Р. А. Вакуумная сушка белковых объектов // Пищевые инновации и биотехнологии : сборник тезисов X Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / под общей редакцией А. Ю. Просекова. Кемерово, 2022. С. 278–279.

14. Морозов С. С., Каширин Д. Е. Вакуумная инфракрасная сушка перги // Наука – Технология – Ресурсосбережение. Сборник научных трудов, посвященный 65-летию со дня образования инженерного факультета Вятской ГСХА : материалы X Международной научно-практической конференции. 2017. С. 172–174.

15. Каширин Д. Е. Вакуумная сушка перги // Пчеловодство. 2006. № 4. С. 50.

16. Касьянов Г. И., Иночкина Е. В., Савина А. М. Вакуумная сушка пищевых продуктов под воздействием ЭМП низких и сверхвысоких частот // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2015. № 6. С. 508–517.

17. Ратникова Л. Б., Влощинский П. Е., Широченко Г. И., Романов В. П. Вакуумная инфракрасная сушка – технология щадящей переработки растительного и животного сырья // Вестник Сибирского университета потребительской кооперации. 2012. № 1(2). С. 96–100.

18. Ермолаев В. А., Просеков А. Ю. Вакуумная сушка рассольных сыров // Достижения науки и техники АПК. 2010. № 4. С. 72–74.

19. Ермолаев В. А. Многоступенчатая вакуумная сушка мягких сыров // Сыроделие и маслоделие. 2009. № 6. С. 36–37.

20. Ермолаев В. А., Сметанин В. С. Способы уменьшения удельных затрат теплоты при вакуумной сушке молочных продуктов // Вестник КрасГАУ. 2010. № 1(40). С. 160–164.

21. Сенсорный анализ продуктов переработки рыбы и беспозвоночных: учеб. пособие / Г. Н. Ким, И. Н. Ким, Т. М. Сафронова, Е. В. Мегеда. Санкт-Петербург : Лань, 2022. 512 с. ISBN 978-5-8114-1654-7. Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. URL: https://e.lanbook.com/book/211661 (дата обращения : 19.09.2025).

22. Лыков А.В. Теория сушки. М. : Энергия, 1968. 472 с.

Сведения об авторе

Е. Г. Тимчук – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой управления техническими системами, SPIN-код: 8836-6556, AuthorID: 987987.

Information about the author

E. G. Timchuk – PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Control of Technical Systems, SPIN-code: 8836-6556, AuthorID: 987987.

Статья поступила в редакцию 01.10.2025; одобрена после рецензирования 05.11.2025; принята к публикации 10.11.2025.

The article was submitted 01.10.2025; approved after reviewing 05.11.2025; accepted for publication 10.11.2025.