

Владимир Аркадьевич Наумов^{1✉}, Николай Леонидович Великанов²,
Олег Васильевич Шарков³

¹Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

^{2,3}Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

¹vladimir.naumov@klgtu.ru

²nvelikanov@kantiana.ru

³osharkov@kantiana.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВАКУУМНОЙ СУШКИ МЕДА

Цель исследования – изучение влияния условий в вакуумной сушильной камере на интенсивность испарения при вакуумной сушке меда. Задачи: получить зависимость интенсивности испарения при сушке от времени; рассчитать максимальные значения интенсивности испарения при изменении теплового потока, толщины слоя, остаточного давления. Объект исследования – процессы вакуумной сушки меда. Исследована динамика изменения относительной массы меда при вакуумной сушке. Представлены результаты расчета максимальных значений интенсивности испарения при сушке при изменении теплового потока, толщины слоя, остаточного давления, температуры. Определены максимальные значения интенсивности испарения меда во время вакуумной сушки при изменении: относительного теплового потока, относительной толщины слоя, относительного давления, относительной температуры. Описана динамика изменения интенсивности испарения при вакуумной сушке меда с разным давлением при изменении относительного давления, относительной температуры, динамика изменения интенсивности испарения при вакуумной сушке меда с разным давлением, динамика изменения относительной массы меда при вакуумной сушке с меда с разной температурой. Графики изменения интенсивности испарения при вакуумной сушке меда имеют ярко выраженные максимумы, соответствующие оптимальному времени сушки. Масса меда стабильно уменьшается с разной скоростью, имеются три ярко выраженных участка. Предложена формула, позволяющая применить разработанную математическую модель для оценки влияния интенсивности испарения при сушке на газодинамические процессы. Вакуумная сушка является эффективным современным процессом, хорошо управляемым, удобным для полной автоматизации процесса. Этот процесс доказал свою пригодность для разных продуктов, включая мед. При этом сохраняется питательная ценность меда. Предложенные математические модели будут способствовать дальнейшему прогрессу в использовании технологий вакуумной сушки.

Ключевые слова: интенсивность испарения меда, влагосодержание меда, конечная влажность меда, скорость сушки меда

Для цитирования: Наумов В.А., Великанов Н.Л., Шарков О.В. Моделирование процессов вакуумной сушки меда // Вестник КрасГАУ. 2025. № 9. С. 329–340. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-9-329-340.

Vladimir Arkadievich Naumov^{1✉}, Nikolay Leonidovich Velikanov², Oleg Vasilievich Sharkov³

¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

^{2,3}Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

¹vladimir.naumov@klgtu.ru

²nvelikanov@kantiana.ru

³osharkov@kantiana.ru

MODELING OF HONEY VACUUM DRYING PROCESSES

The aim of the study is to investigate the influence of conditions in a vacuum drying chamber on the evaporation rate during vacuum drying of honey. Objectives: to obtain the dependence of evaporation rate during drying on time; to calculate the maximum values of evaporation rate with a change in the heat flux, layer thickness, and residual pressure. The object of the study is the processes of vacuum drying of honey. The dynamics of changes in the relative mass of honey during vacuum drying is studied. The results of calculating the maximum values of evaporation rate during drying with a change in the heat flux, layer thickness, residual pressure, and temperature are presented. The maximum values of honey evaporation rate during vacuum drying are determined with a change in the relative heat flux, with a change in the relative layer thickness, relative pressure, and relative temperature. The dynamics of changes in evaporation rate during vacuum drying of honey with different pressures with a change in the relative pressure, with a change in the relative temperature, the dynamics of changes in evaporation rate during vacuum drying of honey with different pressures, the dynamics of changes in the relative mass of honey during vacuum drying from honey with different temperatures are described. The graphs of the change in the evaporation intensity during vacuum drying of honey have clearly defined maxima corresponding to the optimal drying time. The mass of honey steadily decreases at different rates, there are three clearly defined sections. A formula is proposed that allows the application of the developed mathematical model for assessing the effect of evaporation intensity during drying on gas-dynamic processes. Vacuum drying is an effective modern process, well-controlled, convenient for full automation of the process. This process has proven its suitability for various products, including honey. At the same time, the nutritional value of honey is preserved. The proposed mathematical models will contribute to further progress in the use of vacuum drying technologies.

Keywords: honey evaporation rate, honey moisture content, final honey moisture, honey drying rate

For citation: Naumov VA, Velikanov NL, Sharkov OV. Modeling of honey vacuum drying processes. *Bulletin of KSAU*. 2025;(9):329-340. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-9-329-340.

Введение. Полезные свойства меда известны [1–3]. Высушенный мед используется в различных пищевых технологиях. Сушка меда имеет цель сохранения нативных свойств и полезных составляющих. Однако мед является термолабильным продуктом, что требует изыскания высокоэффективных способов сушки, которые позволят сохранить все свойства меда, которыми он обладал до высушивания. В связи с чем научная проблематика заключается анализе и совершенствовании способов и устройств сушки меда, обеспечивающих сохранение их ценных свойств.

Целью исследования [4] является изучение кинетики сушки высушенного в вакууме и сублимированного пчелиного меда, полученного из двух различных сортов: подсолнечный мед (*Helianthus Annuus* L.) и акациевый мед (*Robinia pseudo acacia* L.). Сушка в вакууме проводилась при начальной температуре образцов меда 25 °С, –20 и –40 °С. В образцах свежего и сушеного меда определяли содержание воды, общее количество растворимых сухих веществ, а также активность воды. Сублимационная сушка пчелиного меда при начальной температуре образца –40 °С привела к сокращению времени высыхания, влажности, активности воды и эффективному коэффициенту диффузии влаги.

Применена предварительная обработка.

В качестве потенциального метода получения высококачественного сухого меда была исследована микроволново-вакуумная сушка (MWV) [5]. Жидкий мед нагревали и обезвоживали в сушилке MWV до влажности менее 2,5 % в течение примерно 10 мин. Кривые сушки и изменения температуры образцов были протестированы во время MWV-сушки при различной мощности микроволнового излучения, уровнях вакуумного давления и толщине образцов. Содержание фруктозы, глюкозы, мальтозы и сахарозы в жидком и сухом меде определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Летучие вещества в жидком и сухом меде концентрировали методом твердофазной микроэкстракции (ТФМЭ), разделяли и идентифицировали методом газовой хроматографии-масс-спектрометрии (ГХ–МС). Толщина образца менее 8 мм и вакуумное давление 30 мбар были определены в качестве наилучших параметров для сушки методом MWV. Температура сердцевины образца была примерно такой же, как и температура поверхности, изменения температуры составляли от 30 до 50 °С при более высокой скорости обезвоживания, в то время как при сушке MWV потемнение меда

не происходило. После сушки MWV в меде не наблюдалось существенных изменений в содержании фруктозы, глюкозы, мальтозы и сахарозы. Летучие кислоты, спирты, альдегиды и сложные эфиры составляли основную часть идентифицированных ароматических соединений использованного жидкого меда, а содержание спиртов и сложных эфиров изменялось незначительно. Содержание кислот заметно снизилось, в то время как содержание альдегидов и кетонов заметно возросло в меде, обезвоженном методом MWV-сушки [5].

В [6, 7] непосредственно процесс сушки осуществляется в вакуумной сушильной камере (ВСК). Длина ВСК около 530 мм, диаметр ВСК – 290 мм. Продукт в камере укладывался на специальный поддон, установленный на датчик массы. Объем лабораторной ВКС невелик, всего 0,035 м³. Были подобраны условия (остаточное давление P , тепловой поток Q , толщина слоя меда d , температура воздуха в камере T), обеспечивающие высокое качество конечного продукта. Кроме того, было исследовано влияние указанных условий на энергетические затраты при вакуумной сушке меда с инфракрасными лампами (ВИКС).

В [8] было проведено сравнение ВИКС меда при разном подводе тепла. Проведена органолептическая оценка обезвоженных продуктов, а также оценены энергозатраты при использовании импульсного и ступенчатого способа подвода теплоты. Применение импульсного способа подвода теплоты позволяет на 1–2 балла повысить органолептическую оценку и снизить энергозатраты на 7–12 %. Сделан вывод, что импульсный способ подвода теплоты при вакуумной сушке меда является более предпочтительным.

Результаты [6–8] были получены на лабораторной установке с малым объемом ВКС и

сравнительно небольшой массой загружаемого объекта сушки. Поэтому интенсивность испарения при сушке (ИИС) меда практически не оказывала влияния на протекание газодинамических процессов. В производственных условиях в ВСК большого объема может загружаться достаточно большая масса меда M_0 . Как было показано в [9], чем больше M_0 , тем большее влияние ИИС оказывает на газодинамические процессы в ВКС. Давление в ВКС может заметно возрасти, а время сушки – увеличиться.

Методика [9] была разработана на примере ВИКС сыра. Для ее применения при сушке меда необходимо получить аналитические зависимости ИИС от условий в ВСК. Этому посвящена данная статья.

Цель исследования – изучение влияния условий в вакуумной сушильной камере на интенсивность испарения при вакуумной сушке меда.

Задачи: получить зависимость интенсивности испарения при сушке меда от времени; рассчитать максимальные значения интенсивности испарения при изменении теплового потока, толщины слоя, остаточного давления.

Материалы и методы. Исходными данными послужили результаты экспериментальных исследований [6, 7]. В таблице 1 Wk – влагосодержание меда в конце сушки, tk – время сушки. В [6] лишь указано, что при изменении теплового потока с 2 до 10 кВт/м² значение Wk возросло с 4,5 до 5 % (это строки 1 и 5 в табл. 1). Поэтому значения Wk в строках 2–4 – приближенные. В [7] не приведены конкретные значения Wk . Указано начальное влагосодержание $W_0 = 21,5$ %, а про конечное сказано «около 5 %», что и приведено в таблице 2 (строки 11–18). Значения времени сушки в строках 15–18 – приближенные, так как сняты с графической зависимости.

Таблица 1

Данные опытов ВИКС меда [6]
Data from the VICS experiments on honey [6]

Номер опыта	q кВт/м ²	P кПа	T °C	d мм	Wk %	tk мин
1	2	4	40	10	4,5	270
2	4	4	40	10	≈4,6	240
3	6	4	40	10	≈4,7	225
4	8	4	40	10	≈4,8	210
5	10	4	40	10	5,0	195
6	4	4	40	5	4,3	180
7	4	4	40	10	4,6	240
8	4	4	40	15	4,9	275
9	4	4	40	20	5,4	300

Данные опытов ВИКС меда [7]
Data from the VICS experiments on honey [7]

Номер опыта	q кВт/м ²	P кПа	T °С	d мм	W_k %	tk мин
10	6	2	40	10	около 5	230
11	6	3	40	10	–	245
12	6	4	40	10	–	260
13	6	5	40	10	–	275
14	6	6	40	10	–	285
15	4	4	30	10	–	≈295
16	4	4	40	10	–	≈252
17	4	4	50	10	–	≈192
18	4	4	60	10	–	≈156

Обратим внимание, что условия проведения двух опытов в таблицах 1 и 2 указаны одинаковыми (опыт № 2 из [6] и № 12 из [7]). Установка для ВИКС использовалась одна и та же. Однако во втором случае больше как время сушки (на 35 мин), так и конечная влажность (примерно на 0,3–0,4 %). Но при одинаковых условиях увеличение tk должно приводить к уменьшению W_k . Остается предположить, что были изменены условия, не указанные в таблицах 1, 2. Действительно, в качестве объекта сушки в обеих статьях указан мед натуральный гречишный. Но в [7] указан и год сбора меда – 2019. Тогда как статья [6] была опубликована в 2018 г. Скорее всего, такая разница tk получилась из-за изменения свойств меда. Следовательно, верификацию математической модели необходимо проводить отдельно для данных опытов из таблицы 1 и таблицы 2.

Исходными данными также послужили графики динамики изменения ИИС $J(t)$ (переведем единицы измерения J из %/час в %/мин) и относительной массы меда $m(t)$ из [6]. Заметим, что на графике $m(t)$ (рис. 2 из [6]) отсутствуют числовые значения на оси ординат m . Понятно, что $m_0 = 100$ %. Конечные значения пришлось восстанавливать по формуле (1). Например, при $W_k = 4,5$ % $m_k = 86,0$ %.

$$m_k = 100 \cdot \frac{100 + W_k}{100 + W_0}. \quad (1)$$

ИИС (%/мин) представляет собой производную относительной массы по времени

$$J = \frac{dm}{dt}. \quad (2)$$

В данной статье воспользуемся безразмерными переменными времени и ИИС

$$\tau = t/tk, j = J/Jm, \quad (3)$$

где Jm – наибольшее значение ИИС при рассматриваемых условиях конкретного опыта.

Как правило, при аппроксимации кривых сушки за основу принимают экспериментальную зависимость $m(t)$, а $J(t)$ находят как производную по формуле (2) [10, 11]. Однако известно, что все методы численного дифференцирования являются неустойчивыми из-за случайных погрешностей измерений [12]. В данной статье за основу принята зависимость $J(t)$, для нахождения $m(t)$ используется численное интегрирование. Сушку делят на три этапа (см., например, [13, 14]). Экспериментальные точки [6], использованные на рисунке 1, показывают на отсутствие сколько-нибудь продолжительного периода с $J = \text{const}$; функция $j(\tau)$ возрастает по времени, достигает максимума Jm ($j = 1$) и затем становится убывающей. Поэтому целесообразно аппроксимировать зависимость ИИС меда от времени многочленом n -го порядка $j \equiv \varphi_n(\tau)$

$$\varphi_n(\tau) = b_0 + b_1 \tau + b_2 \tau^2 + \dots + b_n \tau^n, \quad (4)$$

где $b_0, b_1, \dots, b_n$ – эмпирические константы, подлежащие определению по результатам экспериментов.

Тогда размерная функция ИИС выражается через безразмерную следующим образом:

$$J(t) = Jm \cdot \varphi_n(t/tk). \quad (5)$$

Запишем интегральное условие

$$\Delta m = \int_0^{t_k} J(t) dt, \quad \Delta m = 100 - m_k, \quad (6)$$

где Δm – изменение относительной массы за время сушки.

Максимальное размерное значение ИИС найдем, используя (5) и (6)

$$J_m = \frac{\Delta m}{t_k \cdot I}, \quad I = \int_0^1 \varphi_n(\tau) d\tau. \quad (7)$$

Проверку правильности подбора аппроксимации $J(t)$ выполним путем сравнения экспериментальных значений m_e и результатов расчета по формуле

$$m_p(t) = 100 - J_m \cdot \int_0^t \varphi_n\left(\frac{t}{t_k}\right) dt. \quad (8)$$

Для возможности оценки максимальных значений ИИС при различных условиях, как в [15], введем безразмерные величины теплового потока, толщины слоя, остаточного давления, температуры, соответственно

$$q_i = Q_i / Q^*, \quad \delta_i = d_i / d^*, \quad p_i = P_i / P^*, \quad \theta_i = T_i / T^*, \quad (9)$$

где в качестве характерных величин используем следующие значения: $Q^* = \text{кВт/м}^2$; $d^* = 10 \text{ мм}$; $P^* = 4 \text{ кПа}$; $T^* = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты и их обсуждение. На рисунке 1 представлено сравнение результатов расчетов по формуле (4) при $n = 5$ с экспериментальными значениями ИИС. Если увеличивать порядок многочлена, то согласие точек и линий улучшается незначительно. При $n = 4$ это согласие заметно ухудшается. В [6] отмечено, что значения времени сушки найдены со средним квадратичным отклонением (СКО) 10 минут, что составляет не более 5 % от t_k . Линии 4 и 5 на рисунке 1 построены исходя из указанного значения СКО. Линия 3 построена по формуле (4), причем коэффициенты в указанной формуле найдены методом наименьших квадратов по всему массиву экспериментальных точек [6]. Видно, что эти точки находятся внутри обозначенного коридора. Следовательно, можно считать, что динамика ИИС в исследованных условиях может быть аппроксимирована в безразмерных переменных одной функцией $\varphi(\tau)$ с погрешностью, не превышающей СКО экспериментальных данных.

Согласно данным, представленным на рисунке 2, в расчетах можно пользоваться безразмерной функцией ИИС.

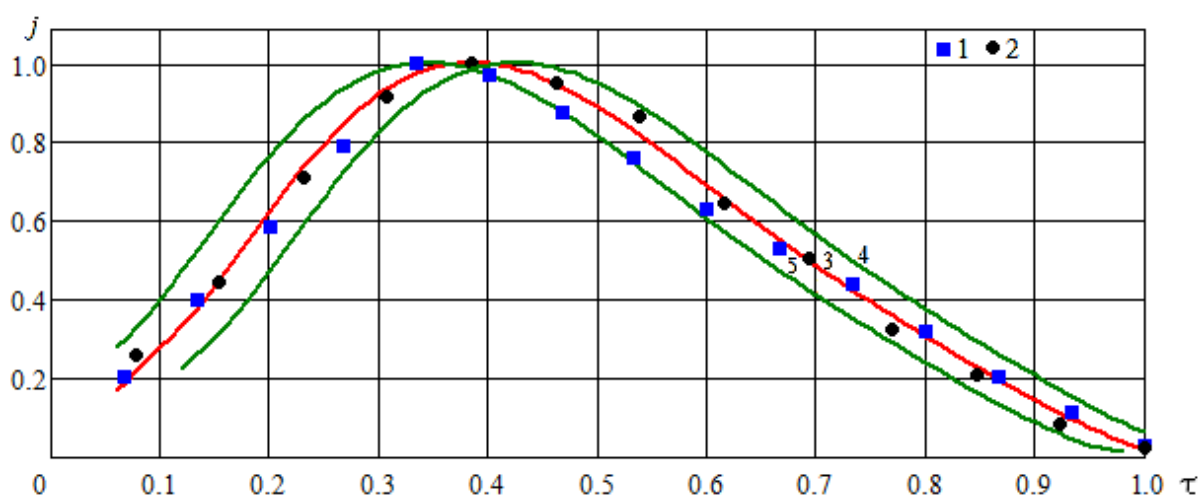


Рис. 1. Динамика изменения интенсивности испарения при сушке меда в безразмерных переменных (точки – экспериментальные данные [6]: 1 – $Q = 6 \text{ кВт/м}^2$; 2 – $Q = 10 \text{ кВт/м}^2$; линии – результат расчета: 3 – аппроксимация массива экспериментальных точек по формуле (4); 4, 5 – границы по СКО безразмерного времени)

Dynamics of change in evaporation intensity during honey drying in dimensionless variables (points – experimental data [6]: 1 – $Q = 6 \text{ kW/m}^2$; 2 – $Q = 10 \text{ kW/m}^2$; lines – calculation result: 3 – approximation of the array of experimental points according to formula (4); 4, 5 – boundaries according to the standard deviation of dimensionless time)

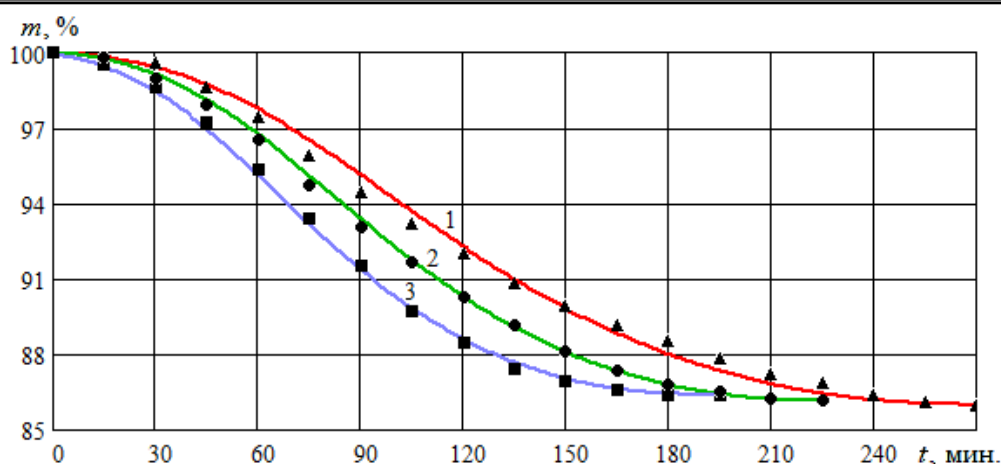


Рис. 2. Динамика изменения относительной массы меда при вакуумной сушке:

1 – $Q = 2 \text{ кВт/м}^2$; 2 – $Q = 4 \text{ кВт/м}^2$; 3 – $Q = 10 \text{ кВт/м}^2$

(точки – экспериментальные данные [6]; линии – результат расчета по формуле (8))

Dynamics of change in relative mass of honey during vacuum drying: 1 – $Q = 2 \text{ kW/m}^2$; 2 – $Q = 4 \text{ kW/m}^2$; 3 – $Q = 10 \text{ kW/m}^2$ (points – experimental data [6]; lines – calculations according to the formula (8))

Интеграл от безразмерной функции ИИС – вторая формула (7), получился $I = 0,538$. Максимальные (размерные) значения ИИС были рассчитаны по первой формуле (7). В таблицах

3, 4 представлены результаты расчета J_m ИИС по данным таблицы 1, в таблицах 5, 6 – по данным таблицы 2.

Таблица 3

Результаты расчета максимальных значений ИИС при изменении теплового потока ($PV = 4 \text{ кПа}$, $T = 40 \text{ °C}$, $d = 10 \text{ мм}$)
Results of calculation of maximum values of IIS with change of heat flow ($PV = 4 \text{ kPa}$, $T = 40 \text{ °C}$, $d = 10 \text{ mm}$)

Номер по табл. 1	q	q	mk	Δm	J_m
	кВт/м ²	–	%	%	%/мин
1	2	0,333	86,0	14,0	0,0963
2	4	0,667	86,1	13,9	0,1077
3	6	1,0	86,2	13,8	0,1142
4	8	1,333	86,3	13,7	0,1216
5	10	1,667	86,4	13,6	0,1294

Таблица 4

Результаты расчета максимальных значений ИИС при изменении толщины слоя ($P = 4 \text{ кПа}$, $T = 40 \text{ °C}$, $q = 4 \text{ кВт/м}^2$)
The results of calculating the maximum values of the AIS when changing the thickness of the layer ($P = 4 \text{ kPa}$, $T = 40 \text{ °C}$, $q = 4 \text{ kW/m}^2$)

Номер по табл. 1	d	δ	mk	Δm	J_m
	мм	–	%	%	%/мин
6	5	0,5	85,8	14,2	0,1461
7	10	1,0	86,1	13,9	0,1077
8	15	1,5	86,3	13,7	0,0923
9	20	2,0	86,7	13,3	0,0821

Таблица 5

Результаты расчета максимальных значений ИИС при изменении остаточного давления
($T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $d = 10\text{ мм}$, $q = 6\text{ кВт/м}^2$)
Results of calculation of maximum values of IIS with change of residual pressure
($T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $d = 10\text{ мм}$, $q = 6\text{ кВт/м}^2$)

Номер по табл. 2	P кПа	p –	mk %	Δm %	Jm %/мин.
10	2	0,25	86,3	13,7	0,1103
11	3	0,5	86,3	13,7	0,1036
12	4	1,0	86,3	13,7	0,0988
13	5	1,25	86,3	13,7	0,0982
14	6	1,75	86,3	13,7	0,0972

Таблица 6

Результаты расчета максимальных значений ИИС при изменении температуры
($P = 4\text{ кПа}$, $d = 10\text{ мм}$, $q = 6\text{ кВт/м}^2$)
Results of calculation of maximum values of IIS with temperature change
($P = 4\text{ кПа}$, $d = 10\text{ мм}$, $q = 6\text{ кВт/м}^2$)

Номер по табл. 2	T °C	p –	mk %	Δm %	Jm %/мин.
15	30	0,75	86,3	13,7	0,0860
16	40	1,0	86,3	13,7	0,1007
17	50	1,25	86,3	13,7	0,1322
18	60	1,5	86,3	13,7	0,1627

Расчетные значения Jm на рисунках 3, 4 показаны точками. Видно, что Jm увеличивается с ростом безразмерных величин теплового потока и температуры, уменьшается – с ростом отно-

сительной толщины слоя и остаточного давления. Зависимость Jm от q и p можно аппроксимировать линейной функцией (рис. 3, а; 4, а):

$$Jm \equiv \psi_1(q) = a_{10} + a_{11} q; Jm \equiv f_1(p) = c_{10} + c_{11} p. \quad (10)$$

Для аппроксимации зависимости Jm от δ и θ потребовался кубический многочлен

$$Jm \equiv \psi_3(q) = a_{30} + a_{31} q + a_{32} q^2 + a_{33} q^3; Jm \equiv f_3(\theta) = c_{30} + c_{31} \theta + c_{32} \theta^2 + c_{33} \theta^3. \quad (11)$$

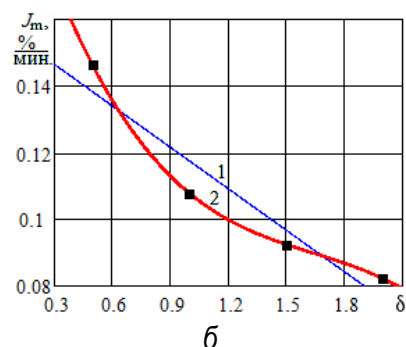
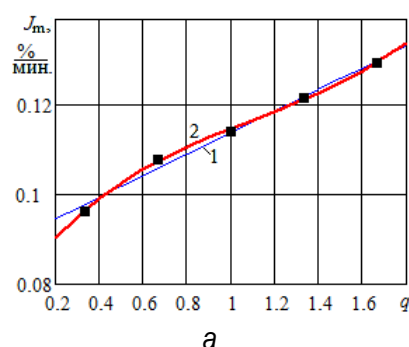


Рис. 3. Максимальные значения интенсивности испарения меда во время вакуумной сушки:
а – при изменении относительного теплового потока, б – при изменении относительной толщины слоя (точки – по результатам экспериментов [6]; линии – расчет:
1 – линейная аппроксимация, 2 – кубическая по формуле (11)

Maximum values of honey evaporation intensity during vacuum drying: а – with a change in the relative heat flow, б – with a change in the relative layer thickness (dots – according to the results of experiments [6]; lines – calculation: 1 – linear approximation, 2 – cubic according to the formula (11)

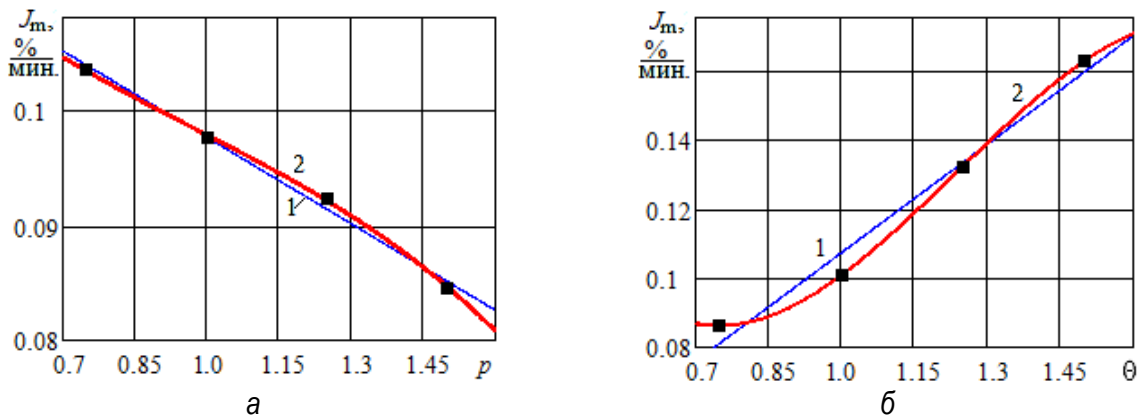


Рис. 4. Максимальные значения интенсивности испарения меда во время вакуумной сушки: а – при изменении относительного давления, б – при изменении относительной температуры (точки – по результатам экспериментов [7]; линии – расчет: 1 – линейная аппроксимация, 2 – кубическая по формуле (11))

Maximum values of honey evaporation intensity during vacuum drying: а – with a change in relative pressure, б – with a change in relative temperature (dots – according to the results of experiments [7]; lines – calculation: 1 – linear approximation, 2 – cubic according to the formula (11))

Рассчитанные J_m позволили исследовать с помощью математической модели динамику ИИС по формуле (5) и относительной массы объекта сушки по формуле (8) при различных значениях определяющих параметров. Результаты представлены на рисунках 5–10.

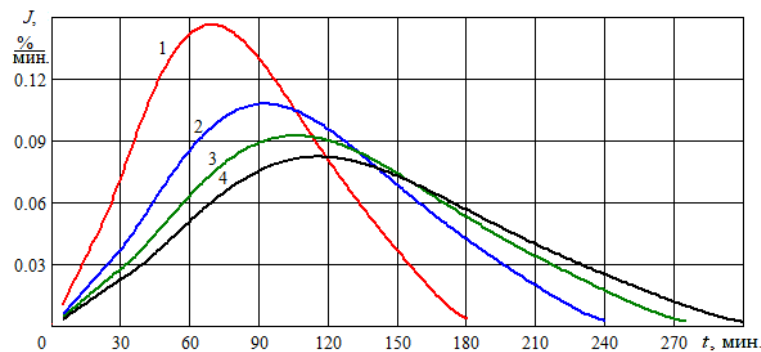


Рис. 5. Динамика изменения интенсивности испарения при вакуумной сушке меда с разной толщиной слоя: 1 – $d = 5$ мм, 2 – $d = 10$ мм, 3 – $d = 15$ мм, 4 – $d = 20$ мм

Dynamics of changes in evaporation intensity during vacuum drying of honey with different layer thicknesses: 1 – $d = 5$ mm, 2 – $d = 10$ mm, 3 – $d = 15$ mm, 4 – $d = 20$ mm

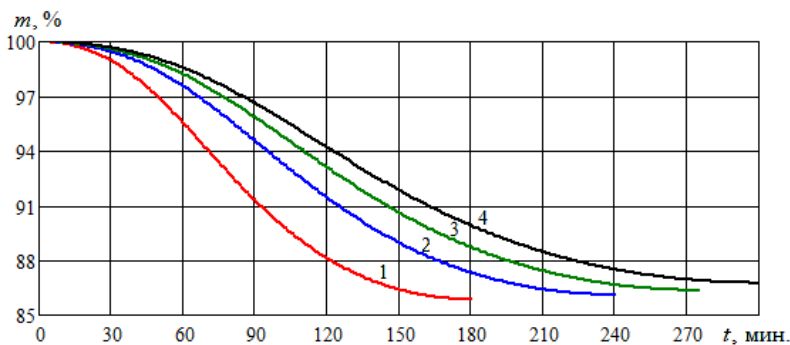


Рис. 6. Динамика изменения относительной массы меда при вакуумной сушке с разной толщиной слоя (обозначения, как на рис. 5)

Dynamics of changes in the relative mass of honey during vacuum drying

with different layer thicknesses (designations as in Fig. 5)

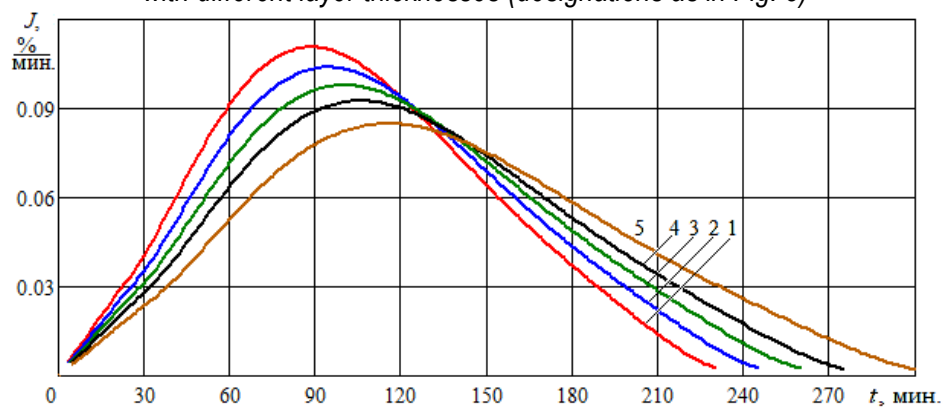


Рис. 7. Динамика изменения интенсивности испарения при вакуумной сушке меда с разным давлением: 1 – $P = 2$ кПа, 2 – $P = 4$ кПа, 3 – $P = 6$ кПа, 4 – $P = 8$ кПа, 5 – $P = 10$ кПа
Dynamics of changes in evaporation intensity during vacuum drying of honey with different pressure: 1 – $P = 2$ kPa, 2 – $P = 4$ kPa, 3 – $P = 6$ kPa, 4 – $P = 8$ kPa, 5 – $P = 10$ kPa

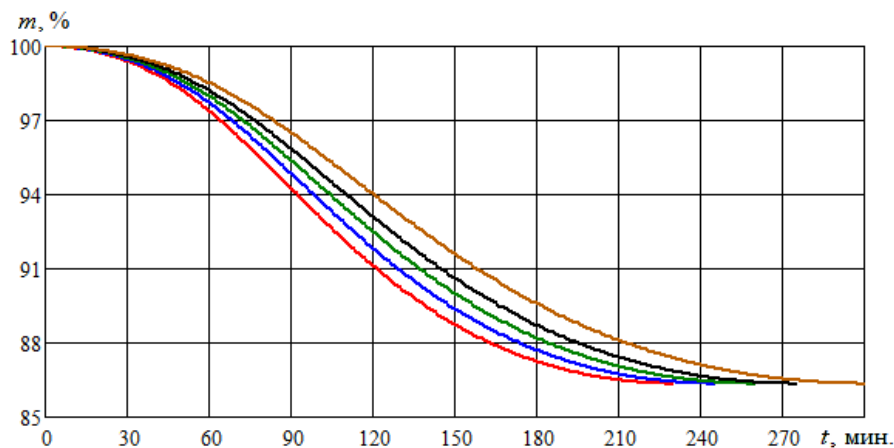


Рис. 8. Динамика изменения относительной массы меда при вакуумной сушке с разным давлением (обозначения, как на рис. 7)
Dynamics of changes in the relative mass of honey during vacuum drying with honey at different pressures (designations as in Fig. 7)

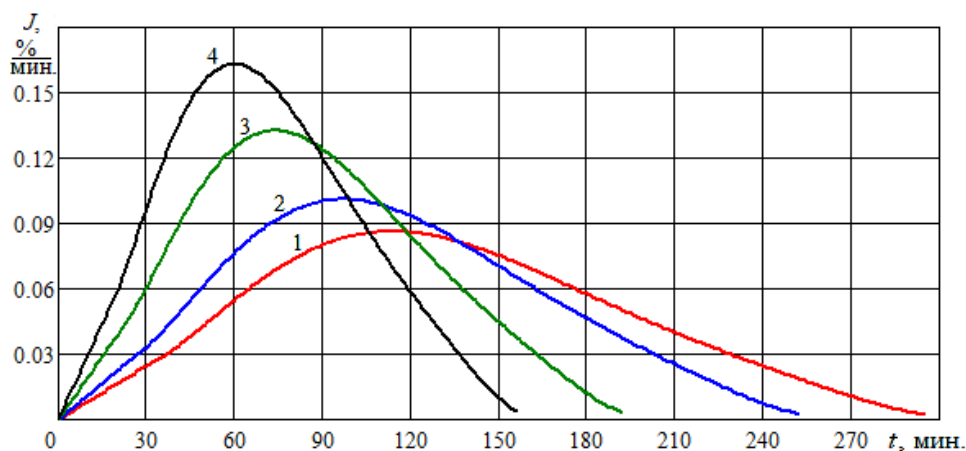


Рис. 9. Динамика изменения интенсивности испарения при вакуумной сушке меда с разной температурой: 1 – $T = 30$ °C, 2 – $T = 40$ °C, 3 – $T = 50$ °C, 4 – $T = 60$ °C
Dynamics of changes in evaporation intensity during vacuum drying of honey at different temperatures: 1 – $T = 30$ °C, 2 – $T = 40$ °C, 3 – $T = 50$ °C, 4 – $T = 60$ °C

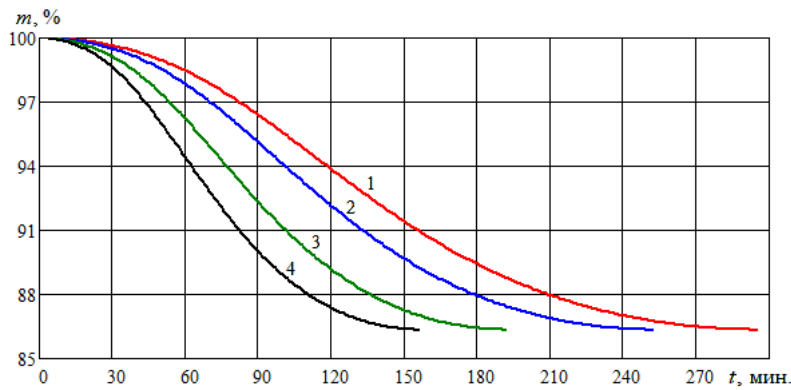


Рис. 10. Динамика изменения относительной массы меда при вакуумной сушке с меда с разной температурой (обозначения, как на рис. 9)

Dynamics of changes in the relative mass of honey during vacuum drying with honey at different temperatures (designations as in Fig. 9)

Графики изменения интенсивности испарения при вакуумной сушке меда (см. рис. 5, 7, 9) имеют ярко выраженные максимумы, соответствующие оптимальному времени сушки. Масса меда стабильно уменьшается с разной скоростью, имеются три ярко выраженных участка (см. рис. 6, 8, 10).

Чтобы использовать предложенную математическую модель для оценки влияния ИИС на газодинамические процессы в ВКС, как в [9], необходимо получить ИИС Θ в м³/мин по следующей формуле:

$$\Theta = 0,01 \cdot J \cdot M_0 / \rho_n, \quad (12)$$

где M_0 – исходная масса объекта сушки, кг; ρ_n – плотность насыщенных паров воды при температуре поверхности меда, кг/м³.

Заключение. Таким образом, цель исследования достигнута: исследовано влияние условий в вакуумной сушильной камере на интенсивность испарения при вакуумной сушке меда. Поставленные задачи выполнены: получена зависимость интенсивности испарения при суш-

ке меда от времени; рассчитаны максимальные значения интенсивности испарения при изменении теплового потока, толщины слоя, остаточного давления. Максимальные значения интенсивности испарения меда во время вакуумной сушки увеличиваются с ростом безразмерных величин теплового потока и температуры, уменьшаются – с ростом относительной толщины слоя и остаточного давления. Графики изменения интенсивности испарения при вакуумной сушке меда по времени имеют ярко выраженные максимумы, соответствующие оптимальному времени сушки. При толщине слоя $d = 5$ мм – 70 мин, $d = 20$ мм – 120 мин; при давлении $P = 2$ кПа – 90 мин, $P = 10$ кПа – 120 мин; при температуре: $T = 30$ °С – 120 мин, при температуре $T = 60$ °С – 60 мин. Предложенная математическая модель позволяет рассчитать динамику изменения интенсивности испарения во время вакуумной сушки меда при различных значениях определяющих параметров. Что позволит применить метод исследования газодинамических процессов ВКС, разработанный в [9].

Список источников

1. Филиппов П.И., Филиппова В.П. Мед и другие продукты пчеловодства в питании и медицине. Ростов-на-Дону: Феникс, 2003. 256 с.
2. Хомутов А.Е., Гинойн Р.В., Лушников О.В., и др. Апитерапия. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2014. 442 с.
3. Кравченко А., Захарова А., Исаева А., и др. Сравнительное исследование качественного состава меда // Аналитика. 2015. № 5. С. 46–58.
4. Nedić N.M., Gojak M.D., Zlatanović I.J., et. al. Study of vacuum and freeze drying of bee honey // Thermal Science. 2020. Vol. 24, N 6, Part B. P. 4241–4251. DOI: 10.2298/tsci200317194n.
5. Cui Z.-W., Sun L.-J., Chen W., et. al. Preparation of dry honey by microwave–vacuum drying // Journal of Food Engineering. 2008. Vol. 84, N 4. P. 582–590. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.06.027.

6. Ермолаев В.А. Исследование процессов вакуумной сушки меда // Вестник КрасГАУ. 2018. № 6 (141). С. 111–115.
7. Ермолаев В.А. Славянский А.А. Разработка режимов вакуумной сушки меда // Хранение и переработка сельхозсырья. 2021. № 1. С. 52–61. DOI: 10.36107/spfp.2021.187.
8. Ермолаев В.А. Обзор способов и экспериментальные исследования сушки меда и пчелиного маточного молочка // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2025. Т. 11, № 1. С. 28–44.
9. Наумов В.А., Великанов Н.Л., Шарков О.В. Выбор вакуумных насосов для сушки сыров // Вестник КрасГАУ. 2024. № 7 (208). С. 194–200. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-7-194-200.
10. Ермолаев Е.А. Разработка математической модели низкотемпературной вакуумной сушки сыров // Вестник КрасГАУ. 2021. № 1 (166). С. 134–142. DOI: 10.36718/1819-4036-2021-1-134-142.
11. Наумов В.А. Аппроксимация результатов лабораторного исследования вакуумной сушки сыров при изменении остаточного давления // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т. 9, № 4. С. 6–14.
12. Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. Санкт-Петербург: Лань, 2022. 672 с.
13. Суслов А.Э., Фатыхов Ю.А. Результаты исследования процесса сушки рыбы (плотва и чехонь) // Процессы и аппараты пищевых производств. 2012. № 1. С. 51.
14. Naumov V.A., Suslov A.A., Fatykhov Yu.A. Experimental study and mathematical modeling of convective fish drying process // Polish Journal of Food Engineering. 2017. Vol. 4/4, N 24. P. 18–22. DOI: 10.1111/J.1745-4549.2012.00729.X.
15. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Работа импульсно-вакуумной системы сбора мелкодисперсных твердых отходов производства // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. № 4 (769). С. 54–60.

References

1. Filippov P.I., Filippova V.P. *Mjod i druge proizvode pcelovodstva v pitanii i medicine*. Rostov-on-Don: Feniks; 2003. (In Russ.).
2. Khomutov A.E., Ginoyan R.V., Lushnikova O.V., et. al. *Apiterapija*. Nizhnij Novgorod: Izd-vo NNGU; 2014. (In Russ.).
3. Kravchenko A., Zakharova A., Isaeva A., et. al. A comparative research of the qualitative composition of honey. *Analytics*. 2015;5:46-58. (In Russ.).
4. Nedić N.M., Gojak M.D., Zlatanović I.J., et. al. Study of vacuum and freeze drying of bee honey. *Thermal Science*. 2020;24(6,B):4241-4251. DOI: 10.2298/tsci200317194n.
5. Cui Z.-W., Sun L.-J., Chen W., et. al. Preparation of dry honey by microwave-vacuum drying. *Journal of Food Engineering*. 2008;84(4):582-590. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.06.027.
6. Ermolaev V.A. The study of the processes of honey vacuum drying. *Bulletin of KSAU*. 2018;6:111-115. (In Russ.).
7. Ermolaev V.A. Slavyanskiy A.A. Development of modes of vacuum drying of honey. *Storage and Processing of Farm Products*. 2021;1:52-61. (In Russ.). DOI: 10.36107/spfp.2021.187.
8. Ermolaev V.A. Study of the efficiency of pulse vacuum drying of honey and royal jelly. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2025;11(1):28-44. (In Russ.).
9. Naumov V.A., Velikanov N.L., Sharkov O.V. Selection of vacuum pumps for cheese drying. *Bulletin of KSAU*. 2024;7:194-200. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2024-7-194-200.
10. Ermolaev E.A. The development of mathematical model of low-temperature vacuum drying of cheeses. *Bulletin of KSAU*. 2021;1:134-142. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2021-1-134-142.
11. Naumov V.A. The laboratory study results approximation of cheeses vacuum drying with a change in residual pressure. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2023;9(4):6-14. (In Russ.).
12. Demidovich B.P., Maron I.A. *Osnovy vychislitel'noj matematiki*. Sankt-Peterburg: Lan', 2022. (In Russ.).
13. Suslov A.E., Fatykhov Yu.A. Rezul'taty issledovaniya processa sushki ryby (plotva i chehon'). *Processy i apparaty pishhevykh proizvodstv*. 2012;1:51. (In Russ.).

14. Naumov VA, Suslov AA, Fatykhov YuA. Experimental study and mathematical modeling of convective fish drying process. *Polish Journal of Food Engineering*. 2017;4/4(24):18-22. DOI: 10.1111/J.1745-4549.2012.00729.X.
15. Velikanov NL, Naumov VA. Pulse-vacuum system operation in collecting the industrial fine-dyspersated solid waste. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 2024;4:54-60. (In Russ.).

Статья принята к публикации 25.08.2025 / The article accepted for publication 25.08.2025.

Информация об авторах:

Владимир Аркадьевич Наумов¹, профессор кафедры техносферной безопасности и природообустройства, доктор технических наук, профессор

Николай Леонидович Великанов², профессор образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий», доктор технических наук, профессор

Олег Васильевич Шарков³, профессор образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий», доктор технических наук, доцент

Information about the authors:

Vladimir Arkadievich Naumov¹, Professor at the Department of Technosphere Safety and Environmental Management, Doctor of Technical Sciences, Professor

Nikolay Leonidovich Velikanov², Professor at the Educational and Scientific Cluster Institute of High Technologies, Doctor of Technical Sciences, Professor

Oleg Vasilievich Sharkov³, Professor at the Educational and Scientific Cluster Institute of High Technologies, Doctor of Technical Sciences, Docent

