Статья поступила в редакцию: 01.10.2026
Статья принята к публикации: 08.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 66.047+664.8+620.9

Импульсные режимы виброконвективной сушки чеснока как резерв снижения удельных энергозатрат: расчётно-теоретическое обоснование

Сафаров Жасур Эсиргапович
д-р техн. наук, проф.
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: jasursafarov@yahoo.com

Султанова Шахноза Абдувахитовна
д-р техн. наук, проф.
Хокимият города Ташкента
Ташкентский государственный технический университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Миркомилов Абдурахмон Мираббос угли
PhD
Ташкентский химико-технологический институт,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: sh.sultanova@yahoo.com

Intermittent modes of vibro-convective garlic drying as a means of reducing specific energy consumption: computational and theoretical justification

Safarov Jasur Esirgapovich
doctor of Technical Sciences, Professor
Tashkent State Technical University
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Sultanova Shakhnoza Abduvakhitovna
Doctor of Technical Sciences, Professor
Tashkent City Administration
Tashkent State Technical University,
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Mirkomilov Abdurakhmon Mirabbos ugli
PhD
Tashkent Institute of Chemical Technology,
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Библиографическое описание: Сафаров Ж.Э., Султанова Ш.А., Миркомилов А.М.У. Импульсные режимы виброконвективной сушки чеснока как резерв снижения удельных энергозатрат: расчётно-теоретическое обоснование // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23518

Аннотация

На основе обобщённой математической модели тепломассопереноса при виброконвективной сушке, учитывающей усадку и виброускорение, выполнено расчётно-теоретическое исследование импульсных режимов сушки ломтиков чеснока: импульсной и ступенчатой вибрации, импульсных нагрева с периодами отлёжки, ступенчатого снижения температуры агента сушки и их комбинаций. Модель дополнена расписаниями воздействий, граничными условиями периода отлёжки, относительными показателями энергозатрат, учитывающими доли мощности калорифера, вентилятора и вибропривода, и кинетикой потерь аллицина второго порядка с аррениусовской зависимостью константы от расчётной температуры продукта. Установлено, что при доле мощности вибропривода 5–15 % прерывание вибрации при Г = 1 не даёт экономии, тогда как при Г = 3 ступенчатое снижение виброускорения после первого периода сушки уменьшает удельные энергозатраты на 29 %; импульсный нагрев с коэффициентом заполнения δ = 0,5–0,67 и периодом 20–30 мин снижает удельные энергозатраты на 6–12 % при увеличении общей продолжительности цикла на 38–71 %; ступенчатый режим 70 → 55 °C обеспечивает наибольшую расчётную сохранность аллицина при энергозатратах на уровне непрерывного режима. Даны рекомендации по выбору режима в зависимости от приоритета энергозатрат, производительности и качества.

Abstract

Based on the generalized mathematical model of heat and mass transfer in vibro-convective drying that accounts for shrinkage and vibration acceleration, a computational study of intermittent (pulsed) regimes of garlic slice drying was carried out: pulsed and stepped vibration, intermittent heating with tempering periods, step-down of the drying air temperature and their combinations. The model was supplemented with actuation schedules, boundary conditions for the tempering period, relative energy indicators that account for the power shares of the heater, fan and vibration drive, and second-order allicin loss kinetics with an Arrhenius dependence of the rate constant on the calculated product temperature. It was found that at a vibration-drive power share of 5–15 % interrupting the vibration at Г = 1 gives no saving, whereas at Г = 3 a stepwise reduction of the vibration acceleration after the first drying period reduces the specific energy consumption by 29 %; intermittent heating with a duty cycle δ = 0.5–0.67 and a period of 20–30 min reduces the specific energy consumption by 6–12 % while increasing the total cycle duration by 38–71 %; the step-down regime 70 → 55 °C provides the highest calculated allicin retention at an energy consumption equal to that of the continuous regime. Recommendations are given for selecting the regime depending on the priority of energy consumption, throughput and quality.

Ключевые слова: виброконвективная сушка, чеснок, импульсный сушка, импульсная вибрация, отлёжка, удельные энергозатраты, аллицин.

Keywords: vibro-convective drying, garlic, intermittent drying, pulsed vibration, tempering, specific energy consumption, allicin.

Введение

Энергосберегающая виброконвективная технология сушки чеснока [10], оптимальные параметры процесса [11] и усовершенствованная конструкция установки [7] разработаны для непрерывного режима, при котором нагрев агента сушки и вибрация поддона осуществляются постоянно в течение всего цикла. Вместе с тем в теории сушки известно, что периодическое прерывание подвода энергии – импульсная сушка – позволяет использовать периоды отлёжки для перераспределения влаги внутри материала, вследствие чего последующий подвод теплоты реализуется с большей эффективностью, а суммарные энергозатраты и термическое повреждение продукта снижаются [2, 5]. При импульсно-вакуумной сушке ломтиков чеснока, обеспечившей наибольшее содержание аллицина среди сравниваемых технологий [12].

Особенность виброконвективной сушки состоит в том, что помимо нагрева прерываться может и вибрационное воздействие. Поскольку мощность вибропривода растёт пропорционально квадрату виброускорения [8], а вклад вибрации в скорость сушки наиболее велик в первом периоде, когда лимитирующим является внешнее сопротивление массопереносу, возникает вопрос о целесообразности импульсной или ступенчатой вибрации. Кроме того, для чеснока температурный режим ограничен кинетикой потерь аллицина – реакцией второго порядка с энергией активации 25,48 кДж/моль [4], причём потери резко возрастают выше 60 °C [9], что делает импульсный и ступенчатые температурные режимы потенциально выгодными и с точки зрения качества.

Цель настоящей работы – расчётно-теоретическое обоснование резерва снижения удельных энергозатрат при виброконвективной сушке чеснока за счёт импульсных режимов вибрации и нагрева на основе обобщённой математической модели тепломассопереноса с учётом усадки и виброускорения [1].

Математическая модель и её дополнение для импульсных режимов

В основу положена разработанная ранее обобщённая модель [1], в которой ломтик чеснока рассматривается как пластина с подвижной границей, а влагоперенос в нормированной координате Ландау $\xi = z/L(t)$ описывается уравнением

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{D_{eff}}{L^2}\frac{\partial^2 X}{\partial \xi^2} + \frac{\xi}{L}\frac{dL}{dt}\frac{\partial X}{\partial \xi}, \quad L(t) = L_0\left[1 - k_{sh}\frac{X_0 - \bar{X}}{X_0}\right], \tag{1}$$

с граничным условием третьего рода на поверхности и сосредоточенным тепловым балансом ломтика; коэффициент диффузии зависит от температуры по Аррениусу, а коэффициенты внешнего переноса — от скорости агента сушки и безразмерного виброускорения $\Gamma = A(2\pi f)^2/g$ через множитель $(1 + a\Gamma^{*n^*})$. Численная схема модели верифицирована по аналитическому решению Крэнка с отклонением не более 0,09 % [1]. Теплофизические параметры и параметры вибрационной интенсификации приняты такими же, как в [1] (табл. 1); в качестве базового выбран режим T_a = 60 °C, v = 2 м/с, лежащий в диапазоне сохранности аллицина [4, 9] и рекомендованный по результатам оптимизации виброконвективной сушки [11].

Расписания воздействий. Импульсный режим задаётся кусочно-постоянными функциями времени: индикатором нагрева $s_h(t) \in \{0; 1\}$, индикатором работы вентилятора $s_f(t)$, температурой агента сушки $T_a(t)$ и виброускорением $\Gamma(t)$. Для периодических режимов с периодом P и коэффициентом заполнения δ

$$s_h(t) = \{1,\ t \bmod P < \delta P;\ \ 0,\ t \bmod P \geq \delta P\}, \qquad \Gamma(t) = \Gamma_{on} s_v(t), \tag{2}$$

где $s_v(t)$ — индикатор вибрации, задаваемый по аналогии с (2) со своими периодом и коэффициентом заполнения либо ступенчато (Γ_1 до момента t_1, далее Γ_2). Ступенчатый температурный режим задаётся как $T_a(t) = T_1$ при $t < t_1$ и T_2 при $t \geq t_1$.

Условия периода отлёжки. При выключенном нагреве ($s_h = 0$) ломтик находится в неподвижном воздухе помещения с температурой T_{amb} и повышенной относительной влажностью, поэтому коэффициенты внешнего переноса и равновесное влагосодержание переключаются на значения, соответствующие естественной конвекции:

$$\beta(t) = s_h \beta_0 (1 + a\Gamma^n) + (1 - s_h)\beta_{nat}, \quad h(t) = s_h h_0 (1 + a\Gamma^n) + (1 - s_h) h_{nat}, \tag{3}$$

$$X_e(t) = s_h X_{e,dry} + (1 - s_h) X_{e,amb}, \quad T_a(t) = s_h T_{a,on} + (1 - s_h) T_{amb}. \tag{4}$$

Показатели энергозатрат. Абсолютные энергозатраты зависят от конструкции конкретной установки, поэтому режимы сопоставлялись по относительному показателю, построенному на долях мощности калорифера α_h, вентилятора α_f и вибропривода α_v в суммарной мощности непрерывного виброконвективного режима при $T_a = 60$ °C и $\Gamma = 1$:

$$E = \int_0^{\tau_d} \left[\alpha_h \theta(t) s_h(t) + \alpha_f s_f(t) + \alpha_v \Gamma(t)^2\right] dt, \quad \theta(t) = \frac{T_a(t) - T_{amb}}{60 - T_{amb}}, \tag{5}$$

$$\frac{SEC}{SEC_1} = \frac{E}{E_1}, \qquad \Delta\tau = \frac{\tau_d}{\tau_{d,1}} - 1, \tag{6}$$

где θ(t) учитывает пропорциональность мощности калорифера перепаду температур при постоянном расходе воздуха; индекс 1 относится к непрерывному виброконвективному режиму ($\Gamma = 1$), принятому за эталон сравнения; Δτ – относительное увеличение продолжительности цикла, характеризующее потерю производительности. Поскольку удаляемая масса влаги одинакова во всех вариантах, отношение энергий равно отношению удельных энергозатрат. Базовые доли αh = 0,70, αf = 0,20, αv = 0,10 приняты по типичной структуре энергопотребления конвективных сушилок с электрокалорифером; их влияние оценено в анализе чувствительности.

Оценка сохранности аллицина. Для сопоставления режимов по качеству использована кинетика потерь аллицинового потенциала второго порядка, установленная для конвективной сушки ломтиков чеснока [4], с аррениусовской зависимостью константы скорости от расчётной температуры продукта $T(t)$:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{AP}\right) = k(T), \quad k(T) = k_{ref} \exp\left[-\frac{E_{AP}}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right], \quad \eta_{AP} = \frac{AP(\tau_d)}{AP_0} \cdot 100\ \%, \tag{7}$$

где kref = 2,91·10−4 г/(мг·мин) при Tref = 60 °C и EAP = 25,48 кДж/моль рассчитаны по данным [4]. Использование расчётной температуры продукта вместо температуры агента сушки позволяет учесть испарительное охлаждение ломтика и его остывание в периоды отлёжки.

Таблица 1. Основные параметры модели и расчётных режимов

Параметр	Значение	Источник / обоснование
Полутолщина ломтика L_0; X_0; $X_{e,dry}$; X_f	1,5 мм; 1,60; 0,05; 0,08 кг/кг	[4]
D_{eff}(60 °C); E_a; k_{sh}	$4{,}0\cdot10^{-10}$ м²/с; 25 кДж/моль; 0,45	[4], [12]
Параметры вибрационной интенсификации a; n; Bi_{m0}	0,4; 0,5; 2,5	[4]
Агент сушки T_a; v; T_{amb}	60 (55; 70) °C; 2 м/с; 20 °C	[2, 9, 10]
Условия отлёжки: h_{nat}; β_{nat}/β_0; $X_{e,amb}$	5 Вт/(м²·К); 0,15; 0,12 кг/кг	естественная конвекция, φ ≈ 50 %
Доли мощности α_h; α_f; α_v (Г = 1)	0,70; 0,20; 0,10	принято; варьируется 0,60–0,80
Кинетика аллицина k_{ref}; E_{AP}; AP_0	$2{,}91\cdot10^{-4}$ г/(мг·мин); 25,48 кДж/моль; 10,91 мг/г	[9]
Периоды и коэффициенты заполнения	P = 10–60 мин; δ = 0,4–1,0	диапазон [5, 6]

Расчётные варианты режимов

Диаграммы воздействий для четырёх характерных вариантов показаны на рис. 1. Дополнительно выполнено параметрическое исследование импульсный нагрева при P = 20, 30 и 60 мин и δ = 0,4–1,0.

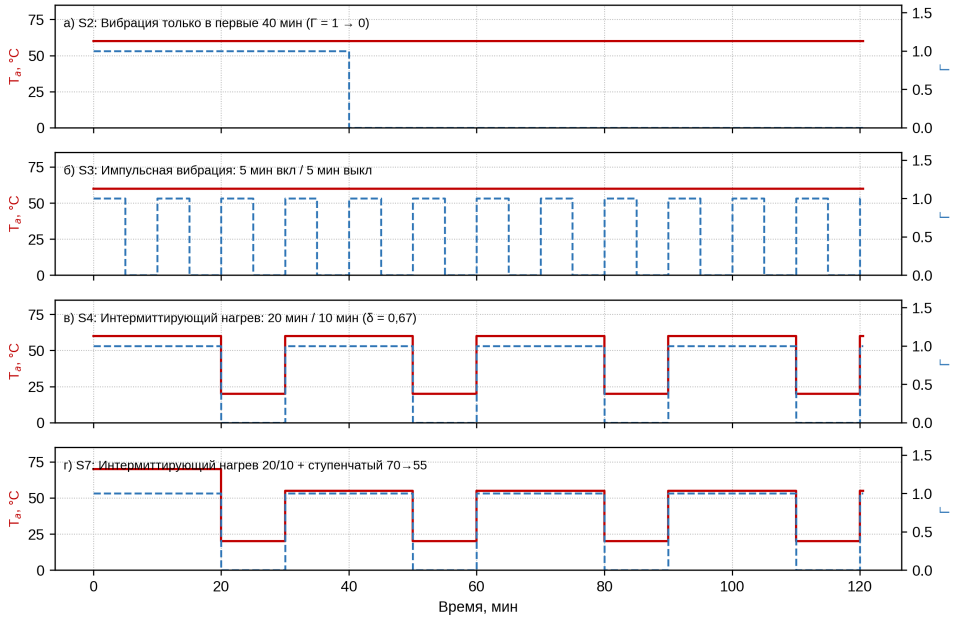


Рисунок 1. Диаграммы воздействий для вариантов S2, S3, S4 и S7: температура агента сушки Ta(t) (сплошная линия, левая ось) и виброускорение Г(t) (штриховая линия, правая ось)

Таблица 2. Расчётные варианты режимов виброконвективной сушки (v = 2 м/с)

Вариант	Описание режима	T_a, °C	Вибрация
S0	Непрерывная конвективная сушка (эталон конвективного способа)	60	Г = 0
S1	Непрерывная виброконвективная сушка (эталон, SEC_1)	60	Г = 1
S2	Вибрация только в первом периоде: Г = 1 в течение 40 мин, далее Г = 0	60	1 → 0
S3	Импульсная вибрация: 5 мин включена / 5 мин выключена (δ_v = 0,5)	60	Г = 1 / 0
S4	импульсный нагрев: 20 мин нагрев / 10 мин отлёжка (P = 30 мин, δ = 0,67)	60 / 20	Г = 1 / 0
S5	импульсный нагрев: 15 мин / 15 мин (P = 30 мин, δ = 0,5)	60 / 20	Г = 1 / 0
S6	Ступенчатый температурный режим: 70 °C в течение 30 мин, далее 55 °C	70 → 55	Г = 1
S7	Комбинация S4 и S6: импульсный нагрев 20/10 мин при 70 → 55 °C	70 → 55 / 20	Г = 1 / 0
S8	Непрерывная виброконвективная сушка при высоком виброускорении	60	Г = 3
S9	Ступенчатая вибрация: Г = 3 в течение 30 мин, далее Г = 1	60	3 → 1
S10	Ступенчатая вибрация: Г = 3 в течение 30 мин, далее Г = 0	60	3 → 0

Результаты и их обсуждение

Эталонные и вибрационные режимы. Причина в том, что каждая минута простоя вибропривода экономит лишь 10 % мощности, тогда как вызванное этим удлинение сушки увеличивает потребление калорифера и вентилятора (90 % мощности). Следовательно, при умеренном виброускорении вибрация должна быть непрерывной.

Картина меняется при высоком виброускорении. Этот результат подтверждает физическую предпосылку: интенсивная вибрация целесообразна лишь в первом периоде сушки, когда влагосодержание поверхности велико и лимитирующим является внешнее сопротивление массопереносу [3]; по мере перехода процесса в область внутреннего диффузионного контроля дальнейшее увеличение β не ускоряет сушку, а мощность вибропривода расходуется впустую.

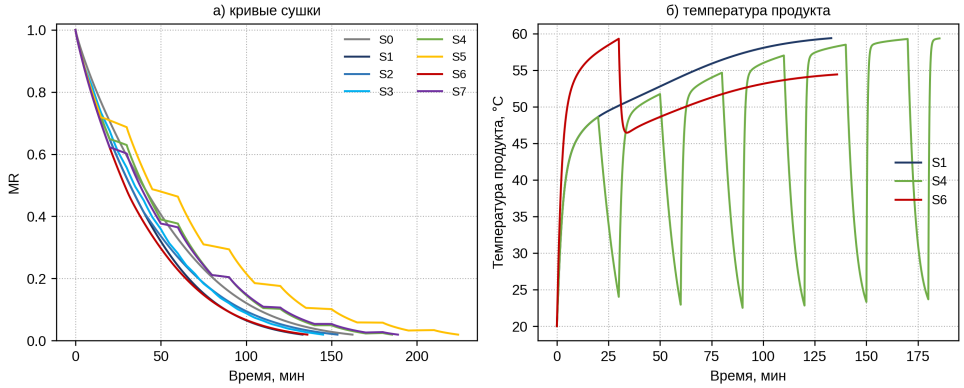


Рисунок 2. Кривые сушки для вариантов S0–S7 (а) и температура продукта для непрерывного (S1), импульсный (S4) и ступенчатого (S6) режимов (б)

Таблица 3. Расчётные показатели режимов виброконвективной сушки ломтиков чеснока до Xf = 0,08 кг/кг

Вариант	τ_d, мин	Время нагрева, мин	SEC/SEC$_1$	Δτ, %	η_{AP}, %	Средняя *T* продукта, °C
S0	162,2	162,2	1,098	+22	70,3	52,5
S1	133,0	133,0	1,000	+0	73,8	53,5
S2	153,4	153,4	1,069	+15	70,9	53,5
S3	145,0	145,0	1,038	+9	72,3	53,1
S4	185,4	125,4	0,943	+39	70,5	46,6
S5	224,1	119,1	0,896	+69	69,2	41,5
S6	135,8	135,8	0,991	+2	74,3	51,9
S7	188,9	128,9	0,924	+42	71,4	44,8
S8	120,2	120,2	1,627	−10	75,4	54,0
S9	129,7	129,7	1,156	−2	74,0	53,9
S10	151,5	151,5	1,229	+14	71,0	53,8

Импульсный нагрев. Периоды отлёжки, в течение которых выключаются калорифер, вентилятор и вибропривод, обеспечивают реальную экономию: в варианте S4 (20 мин нагрев / 10 мин отлёжка) время работы калорифера сокращается со 133,0 до 125,4 мин, энергозатраты — до 0,94 (экономия 5,7 %), а общая продолжительность цикла возрастает до 185,4 мин (Δτ = +39 %). Механизм экономии виден на рис. 2, б: в период отлёжки продукт остывает до 23–25 °C, влага перераспределяется от центра к поверхности, часть её испаряется в окружающий воздух без затрат энергии, а после включения нагрева скорость сушки на короткое время возвращается к уровню первого периода. Показательно, что относительные энергозатраты S4 и S5 не зависят от долей мощности α (табл. 4), поскольку в период отлёжки выключаются все потребители одновременно.

Параметрическое исследование (рис. 3) показывает монотонное снижение энергозатрат с уменьшением коэффициента заполнения δ: при P = 20 мин экономия составляет 5,3 % при δ = 0,75, 6,8 % при δ = 0,67, 11,6 % при δ = 0,5 и 14,1 % при δ = 0,4; однако продолжительность цикла возрастает при этом до 165,9, 183,9, 227,5 и 282,3 мин соответственно.

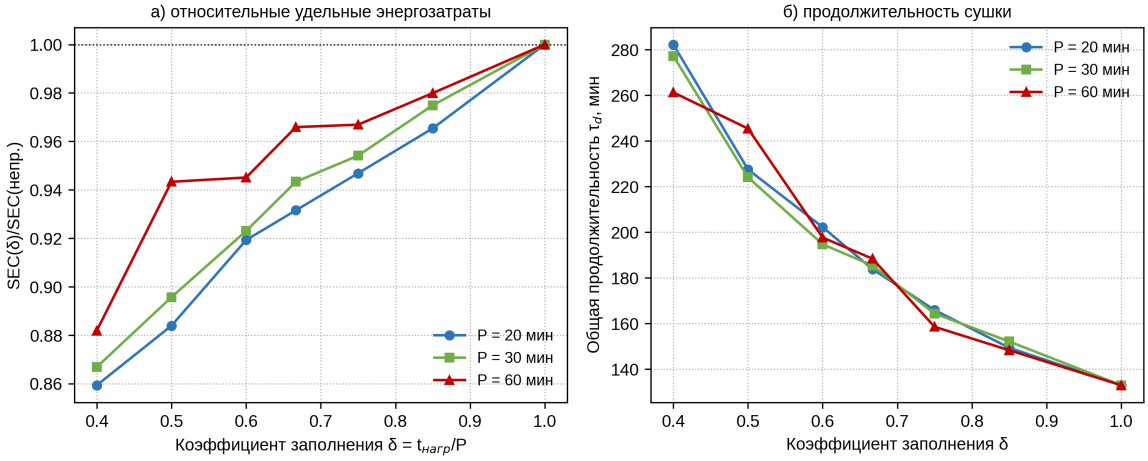


Рисунок 3. Относительные удельные энергозатраты (а) и продолжительность сушки (б) при импульсный нагреве в зависимости от коэффициента заполнения δ при различных периодах P; Ta = 60 °C, Г = 1

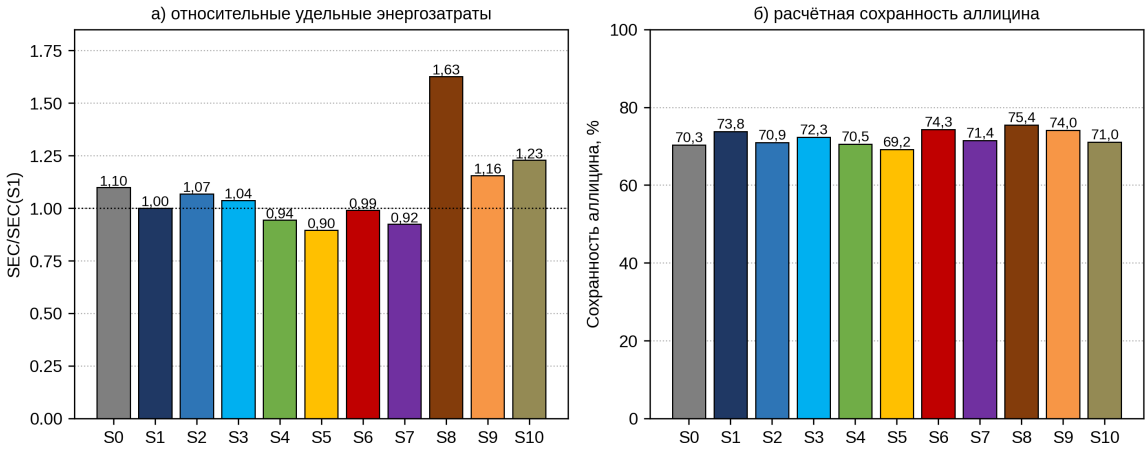


Рисунок 4. Относительные удельные энергозатраты (а) и расчётная сохранность аллицина (б) для вариантов S0–S10

Ступенчатый температурный режим и сохранность аллицина. Ступенчатый режим S6 (70 °C в первые 30 мин, затем 55 °C) обеспечивает сохранность 74,3 % — наибольшую среди режимов с Г = 1 — при энергозатратах 0,99 и продолжительности 135,8 мин, практически равных непрерывному режиму S1. Его выгода объясняется тем, что в первом периоде испарительное охлаждение удерживает температуру ломтика на 12–15 °C ниже температуры агента сушки (рис. 2, б), поэтому повышенная температура агента в этот период ускоряет сушку, не приводя к перегреву продукта, а последующее снижение до 55 °C защищает аллицин на завершающем этапе, когда продукт прогревается до температуры агента.

Чувствительность к структуре энергопотребления. Поскольку выводы о целесообразности прерывания вибрации зависят от доли мощности вибропривода, расчёт повторён для трёх наборов долей (табл. 4). Следовательно, качественные выводы работы устойчивы к неопределённости структуры энергопотребления конкретной установки.

Таблица 4. Относительные удельные энергозатраты SEC/SEC1 при различных долях мощности калорифера, вентилятора и вибропривода

α_h / α_f / α_v	S0	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
0,60 / 0,25 / 0,15	1,04	1,03	1,01	0,94	0,90	1,00	0,93	1,99	1,25	1,27
0,70 / 0,20 / 0,10	1,10	1,07	1,04	0,94	0,90	0,99	0,92	1,63	1,16	1,23
0,80 / 0,15 / 0,05	1,16	1,11	1,06	0,94	0,90	0,99	0,92	1,27	1,07	1,18

Рекомендации по выбору режима. Обобщение результатов позволяет сформулировать правила построения энергосберегающих режимов виброконвективной сушки чеснока: 1) при умеренном виброускорении (Г ≈ 1) вибрация должна быть непрерывной; 2) если для повышения производительности или равномерности используется высокое виброускорение (Г ≈ 3), его следует снижать до Г ≈ 1 после первого периода сушки (ориентировочно 30 мин, до достижения MR ≈ 0,4–0,5), что экономит около 30 % энергии; 3) при приоритете энергозатрат целесообразен импульсный нагрев с P = 20–30 мин и δ = 0,5–0,67 (экономия 6–12 %), при приоритете производительности — непрерывный или ступенчатый по температуре режим;

Заключение

1. Обобщённая модель тепломассопереноса при виброконвективной сушке [1] дополнена расписаниями воздействий, граничными условиями периода отлёжки, относительным показателем энергозатрат с учётом долей мощности калорифера, вентилятора и вибропривода и кинетикой потерь аллицина, что позволяет расчётным путём сопоставлять импульсный режимы по продолжительности, энергозатратам и качеству.

2. Импульсная и ступенчатая вибрация при Г = 1 не снижает энергозатраты (SEC/SEC_1 = 1,04–1,07), так как экономия мощности вибропривода меньше дополнительных затрат калорифера и вентилятора при удлинении сушки; при Г = 3 ступенчатое снижение виброускорения до Г = 1 после первого периода сокращает энергозатраты на 29 % при потере лишь 8 % производительности.

3. Импульсный нагрев с периодами отлёжки является реальным резервом энергосбережения: при P = 20–30 мин и δ = 0,5–0,67 удельные энергозатраты снижаются на 6–12 %, при δ = 0,4 — на 14 %, при увеличении продолжительности цикла на 38–112 %; результат не зависит от структуры энергопотребления установки.

4. Ступенчатый режим 70 → 55 °C обеспечивает наибольшую расчётную сохранность аллицина (74,3 %) при энергозатратах и продолжительности, равных непрерывному режиму; импульсный нагрев по сохранности аллицина преимущества не даёт из-за удлинения цикла.

5. Наиболее перспективными для экспериментальной проверки являются режимы S6 (ступенчатая температура), S9 (ступенчатая вибрация) и S4 (импульсный нагрев 20/10 мин), охватывающие приоритеты качества, производительности и энергозатрат.

Список литературы

1. Миркомилов А.М. Обобщённая математическая модель тепломассопереноса при виброконвективной сушке с учётом усадки и виброускорения // (статья направлена в печать). – 2026.
2. Chua K.J., Mujumdar A.S., Chou S.K. Intermittent drying of bioproducts – an overview // Bioresource Technology. – 2003. – Т. 90, № 3. – P. 285–295.
3. De Munck M.J.A., Marrevee D.P.F., Peters E.A.J.F., Kuipers J.A.M. Experimental study on binary solids drying in a vibro-fluidized bed // Powder Technology. – 2024. – Т. 435. – Art. 119437.
4. Doganturk M., Demiray E., Gursoy O., Yilmaz Y. Kinetics of allicin potential loss in garlic slices during convective drying // Quality Assurance and Safety of Crops & Foods. – 2019. – Т. 11, № 3. – P. 211–220.
5. Kumar C., Karim M.A., Joardder M.U.H. Intermittent drying of food products: a critical review // Journal of Food Engineering. – 2014. – Т. 121. – P. 48–57.
6. Mayor L., Sereno A.M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review // Journal of Food Engineering. – 2004. – Т. 61, № 3. – P. 373–386.
7. Mirkomilov A.M., Safarov J.E., Sultanova Sh.A. Improvement of an energy-saving vibro-convective dryer and the garlic drying process based on ANSYS Fluent modeling // American Journal of Biology and Natural Sciences. – 2026. – Т. 6, № 3. – P. 83–87.

8. Pakowski Z., Mujumdar A.S., Strumillo C. Theory and application of vibrated beds and vibrated fluid beds for drying processes // Advances in Drying / ed. A.S. Mujumdar. – 1984. – T. 3. – P. 245–306.
9. Rahman M.S., Al-Shamsi Q.H., Bengtsson G.B., Sablani S.S., Al-Alawi A. Drying kinetics and allicin potential in garlic slices during different methods of drying // Drying Technology. – 2009. – T. 27, № 3. – P. 397–404.
10. Safarov J.E., Sultanova Sh.A., Mirkomilov A.M. Energy saving technology for drying garlic (Allium sativum) // Technical science and innovation. – 2024. – № 4. – P. 10–14.
11. Safarov J.E., Sultanova Sh.A., Mirkomilov A.M. Determination of optimal parameters for quality drying of garlic using the vibroconvective method // Chemical technology, control and management. – 2025. – № 2 (122). – P. 9–18.
12. Zheng Z.-A., Wang S.-Y., Wang H., Xiao H., Liu Z.-L., Pan Y.-H., Gao L. Comparative study on the influence of various drying techniques on drying characteristics and physicochemical quality of garlic slices // Foods. – 2023. – T. 12, № 6. – Art. 1314.

References

1. Mirkomilov A.M. [Generalized mathematical model of heat and mass transfer in vibro-convective drying taking into account shrinkage and vibration acceleration] // (stat'ya napravlena v pechat'). – 2026. (In Russ.).
2. Chua K.J., Mujumdar A.S., Chou S.K. Intermittent drying of bioproducts – an overview // Bioresource Technology. – 2003. – Vol. 90, No. 3. – P. 285–295.
3. De Munck M.J.A., Marrevee D.P.F., Peters E.A.J.F., Kuipers J.A.M. Experimental study on binary solids drying in a vibro-fluidized bed // Powder Technology. – 2024. – Vol. 435. – Art. 119437.
4. Doganturk M., Demiray E., Gursoy O., Yilmaz Y. Kinetics of allicin potential loss in garlic slices during convective drying // Quality Assurance and Safety of Crops & Foods. – 2019. – Vol. 11, No. 3. – P. 211–220.
5. Kumar C., Karim M.A., Joardder M.U.H. Intermittent drying of food products: a critical review // Journal of Food Engineering. – 2014. – Vol. 121. – P. 48–57.
6. Mayor L., Sereno A.M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review // Journal of Food Engineering. – 2004. – Vol. 61, No. 3. – P. 373–386.
7. Mirkomilov A.M., Safarov J.E., Sultanova Sh.A. Improvement of an energy-saving vibro-convective dryer and the garlic drying process based on ANSYS Fluent modeling // American Journal of Biology and Natural Sciences. – 2026. – Vol. 6, No. 3. – P. 83–87.
8. Pakowski Z., Mujumdar A.S., Strumillo C. Theory and application of vibrated beds and vibrated fluid beds for drying processes // Advances in Drying / ed. A.S. Mujumdar. – 1984. – Vol. 3. – P. 245–306.
9. Rahman M.S., Al-Shamsi Q.H., Bengtsson G.B., Sablani S.S., Al-Alawi A. Drying kinetics and allicin potential in garlic slices during different methods of drying // Drying Technology. – 2009. – Vol. 27, No. 3. – P. 397–404.

10. Safarov J.E., Sultanova Sh.A., Mirkomilov A.M. Energy saving technology for drying garlic (Allium sativum) // Technical science and innovation. – 2024. – No. 4. – P. 10–14.
11. Safarov J.E., Sultanova Sh.A., Mirkomilov A.M. Determination of optimal parameters for quality drying of garlic using the vibroconvective method // Chemical technology, control and management. – 2025. – No. 2 (122). – P. 9–18.
12. Zheng Z.-A., Wang S.-Y., Wang H., Xiao H., Liu Z.-L., Pan Y.-H., Gao L. Comparative study on the influence of various drying techniques on drying characteristics and physicochemical quality of garlic slices // Foods. – 2023. – Vol. 12, No. 6. – Art. 1314.