

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЛУБОКОЙ СУШКИ ГРАНУЛИРОВАННОГО ПОЛИАМИДА ПРИ КОНВЕКТИВНО-ИНФРАКРАСНОМ ЭНЕРГОПОДВОДЕ**С.П. Рудобашта, Г.А. Зуева, В.А. Зайцев**

Станислав Павлович Рудобашта

Кафедра теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, Российская Федерация, 127550

E-mail: rudobashta@mail.ru

Галина Альбертовна Зуева

Кафедра высшей и прикладной математики, Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский пр., 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: zueva_galina15@mail.ru *

Виктор Александрович Зайцев

Кафедра технической кибернетики и автоматики, Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский пр., 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

На основе аналитического решения задачи, описывающей процесс сушки тела цилиндрической формы при комбинированном подводе теплоты (непрерывном конвективном и прерывистом инфракрасном), проанализировано влияние температурного режима нагрева тела на продолжительность сушки и затраты электрической энергии, потребляемой инфракрасным излучателем. Динамику прерывистого инфракрасного нагрева цилиндрического тела моделировали на основе аналитического решения задачи, которое учитывает прерывистость облучения с помощью единичной функции Хевисайда и поглощение электромагнитной энергии по экспоненциальному закону, а также конвективный тепло- и массообмен поверхности тела с внешней средой постоянных параметров. Кинетику сушки тела рассчитывали по аналитическому решению задачи диффузии влаги в материале при граничном условии массообмена третьего рода, при условии, что фазовые превращения происходят у поверхности тела. Выполнен анализ внутреннего массопереноса при глубокой сушке гранулированных полимеров, на основе которого обоснован диффузионный механизм переноса влаги внутри материала, в качестве которого был выбран полиамид марки ПА-6 в форме цилиндрического прутка. Анализ показал, что процесс сушки указанного прутка полиамида протекает во внутридиффузионной области, характеризующимся тем условием, что влагосодержание прутка у его поверхности сразу после начала процесса принимает равновесное значение, которое рассчитывалось в ходе выполнения анализа температурного режима сушки. Проведено численное моделирование взаимосвязанного процесса сушки и нагрева цилиндрического прутка полиамида из полиамида ПА-6 в условиях комбинированного конвективно-инфракрасного энергоподвода, на основе которого сделаны выводы о выборе температурного режима процесса.

Ключевые слова: конвективно-инфракрасный нагрев, сушка, диффузия, гранулированные полимеры, конвективный тепло- и массообмен, прерывистое облучение, аналитическое решение

Для цитирования:Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зайцев В.А. Моделирование процесса глубокой сушки гранулированного полиамида при конвективно-инфракрасном энергоподводе. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 12. С. 94–100**For citation:**Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zaytsev V.A. Modeling of the deep drying process of granulated polyamide at convective-infrared energy sub-supply. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2019. V. 62. N 12. P. 94–100

MODELING OF THE DEEP DRYING PROCESS OF GRANULATED POLYAMIDE AT CONVECTIVE-INFRARED ENERGY SUB-SUPPLY

S.P. Rudobashta, G.A. Zueva, V.A. Zaytsev

Stanislav P. Rudobashta

Department of Heat Engineering, Hydraulics and Enterprises Energy Supply, Russian State Agrarian University – MAA after K. A. Timiryazev, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127550, Russia
E-mail: rudobashta@mail.ru

Galina A. Zueva *

Department of Higher and Applied Mathematics, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetievskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia
E-mail: zueva_galina15@mail.ru *

Victor A. Zaytsev

Department of Technical Cybernetics and Automation, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetievskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

On the basis of an analytical solution of the problem describing the drying process of a cylindrical body with a combined heat supply (continuous convective and intermittent infrared), the influence of the temperature mode of heating the body on the drying time and the consumption of electrical energy consumed by an infrared emitter is analyzed. The dynamics of intermittent infrared heating of a cylindrical body was modeled on the basis of an analytical solution of the problem, which takes into account the irregularity of irradiation using a unit Heaviside function and the absorption of electromagnetic energy exponentially, as well as convective heat and mass transfer of the body surface with the environment of constant parameters. The kinetics of body drying has been calculated by analytically solving the problem of moisture diffusion in the material with the third type mass transfer boundary condition provided that phase transformations occur at the surface of the body. An internal mass transfer analysis has been performed with deep drying of granular polymers, on the basis of which the diffusion mechanism of moisture transfer inside the material was substantiated, for which PA-6 polyamide in the form of a cylindrical rod has been chosen. The analysis showed that the drying process of the specified polyamide rod occurs in the intra-diffusion region, characterized by the condition that the moisture content of the rod near its surface immediately after the process starts takes an equilibrium value, which was calculated during the analysis of the drying temperature regime. A numerical simulation of the interconnected process of drying and heating a cylindrical rod of polyamide PA-6 under conditions of a combined convective-infrared power supply was conducted, on the basis of which conclusions were made about the choice of the temperature mode of the process.

Key words: convective infrared heating, drying, diffusion, granulated polymers, convective heat and mass transfer, intermittent irradiation, analytical solution

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию процесса электромагнитной (в том числе инфракрасной) сушки различных материалов в последние годы уделяется большое внимание [1-5]. Для сохранения качества термолабильных материалов во избежание их перегрева инфракрасный энергоподвод осуществляется, как правило, в прерывистом (осциллирующем) режиме [2-8]. В [2, 3, 9-14] приведены математические модели, описывающие прерывистый процесс электромагнитной и комбинированной (конвективно-электромагнитной) сушки. Наличие математиче-

ской модели позволяет путем численного эксперимента проводить анализ процесса и выбирать необходимый технологический режим. При математическом моделировании прерывистой сушки используют как численные методы [2, 3, 6, 11], так и аналитические [9, 13-15]. Аналитические формулы, как правило, могут быть получены только при решении линейных дифференциальных уравнений тепло-и массообмена [16-18], тогда как численные методы не имеют этого ограничения. Хотя получение аналитических решений требует громоздких выкладок, они дают конечную формулу для расчета, тогда как при использовании численных методов необходимо выполнять расчеты по

всей области изменения целевой функции для получения конечного результата. Процессы сушки характеризуются изменением теплофизических характеристик и технологических параметров в ходе процесса [17, 19], что приводит к нелинейным дифференциальным уравнениям, описывающим теплообмен. В [17] представлен универсальный зональный метод кинетического расчета массообменных процессов (в том числе процесса сушки), основанный на использовании решений линейного дифференциального уравнения теплопроводности (диффузии влаги), позволяющий учесть эти изменения.

При формовании изделий на литьевых и шприцмашинах из исходного полимерного гранулята он, во избежание брака, должен быть высушен до низкой остаточной влажности (глубокая сушка). При этом из-за необходимости получения низкой конечной влажности высушиваемого продукта приходится использовать сушильный агент с низкой начальной влажностью, а для поддержания высокой его температуры и низкой влажности во всем рабочем объеме аппарата применять большой его удельный расход, что удорожает процесс. Комбинированная конвективно-инфракрасная сушка гранулированных полимеров выгодно отличается от чисто конвективной сушки тем, что инфракрасный подвод теплоты на проведение процесса не зависит от расхода сушильного агента, это позволяет выбирать последний независимо от его расхода, и тем самым находить энергетически более экономный режим.

При осциллирующем инфракрасном энергоподводе к высушиваемому продукту температура последнего колеблется в диапазоне от \bar{t}_{\min} до \bar{t}_{\max} , при этом, если температура \bar{t}_{\max} задается в соответствии с технологическими условиями, то температура \bar{t}_{\min} может выбираться произвольно. Высокое ее значение будет влиять на затраты энергии, подводимой с помощью излучателя, а ее понижение будет приводить к замедлению процесса сушки. Представляет интерес проанализировать влияние температуры \bar{t}_{\min} при фиксированном значении \bar{t}_{\max} на энергозатраты и продолжительность процесса глубокой сушки гранулированного полимера конвективно-инфракрасным методом.

Анализ этого процесса проводили на основе аналитического решения задачи [20] – для гранул полиамида ПА-6 в форме прутка. Решение получено при следующих условиях и допущениях: 1) массообмен в теле осуществляется путем

массообменности (диффузии влаги); 2) внутренние фазовые превращения отсутствуют; 3) циклы «нагрев-остывание» тела одинаковы по длительности с одинаковыми значениями в них длительностей стадий нагрева и остывания; 4) все теплофизические и электрофизические характеристики материала, кинетические характеристики процесса, а также температура сушильного агента и концентрация пара в нем постоянны; 5) вследствие небольшой амплитуды колебаний температурного поля при инфракрасном нагреве и намного большей инерционности поля влагосодержаний в материале по сравнению с температурным полем осцилляции температуры не искажают кривую кинетики сушки, и она имеет гладкий монотонный характер (что подтверждается экспериментально [14]).

При переработке гранул полиамида ПА-6 в изделия начальное влагосодержание, ввиду гигроскопичности этого материала, может составлять 4,5%, а высушить его, согласно технологическому регламенту, необходимо до влагосодержания ~ 0,05%. Из-за окисляемости полиамида для исключения его контакта с кислородом применяют две технологии сушки: сушку в токе азота при температуре последнего 140 °С и сушку в вакууме. Рассмотрим сушку в токе азота, приняв $\bar{t}_{\max} = 140$ °С, $d^* = 3$ мм, $\bar{u}_n = 0,045$ кг/кг, $\bar{u}_k = 0,05 \cdot 10^{-2}$ кг/кг, $t_n = 18$ °С, температуру сушильного агента (азота), обдувающего прутки, $t_c = 100$ °С, $A = 0,9$, $\mu^* = 3000$ л/м; $q_0 = 1000$ Вт/м², теплофизические характеристики полиамида ПА-6: теплопроводность $\lambda = 0,28$ Вт/(м К), теплоемкость $c = 2,1$ Дж/(кг К); плотность $\rho_0 = 1120$ кг/м³. Расчет проведем для значений $t_{\min} = 135$ °С, 130 °С и 125 °С. Будем считать, что длина прутка много больше его диаметра, так что можно принять прутки за бесконечный цилиндр.

Для анализа динамики изменения среднеобъемной температуры прутка при осциллирующей инфракрасной сушке воспользуемся аналитическим решением задачи, приведенным в [20], которое применительно к среднеобъемной температуре прутка при $t_n = \text{const}$ имеет вид

$$\begin{aligned} \bar{W}(Fo) = & 2^2 f_0^* \text{Bi}^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-\mu_n^2 Fo)}{\mu_n^2 (\mu_n^2 + \text{Bi}^2)} + \\ & + 2^2 \theta_0 \text{Bi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Psi(\mu_n, \mu_0^*)}{(\mu_n^2 + \text{Bi}^2) J_0(\mu_n)} \\ & \int_0^{Fo} \exp(-\mu_n^2 (Fo - \tau')) f_1^*(\tau') d\tau' + 2^2 \text{Bi}^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2 (\mu_n^2 + \text{Bi}^2)} \\ & \int_0^{Fo} \exp(-\mu_n^2 (Fo - \tau')) \varphi^*(\tau') d\tau', \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{где: } \bar{W}(Fo) = \frac{[t(\tau) - t_c] + (r^*/\alpha) i(\tau)}{t_0 - t_c};$$

$$\Psi(\mu_n, \mu_0^*) = \int_0^1 \rho J_0(\mu_n \rho) \exp(\mu_0^*(1 - \rho)) d\rho; \quad \mu_0^* = \mu^* R;$$

$$\varphi^*(\tau) = \frac{R^2}{a(t_0 - t_c)} \frac{d\varphi(\tau)}{d\tau} = \frac{R^2 r^*}{\alpha a(t_0 - t_c)} \frac{di(\tau)}{d\tau};$$

$$\theta_0 = \frac{\mu^* q_0 A R^2}{\lambda(t_0 - t_c)}; \quad f_1^*(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \eta(\tau - n\tau_{\text{ц}}) - \eta\left[\tau - (n\tau_{\text{ц}} + \tau_{\text{нар}})\right] -$$

единичная периодическая функция, отражающая цикличность облучения; μ_n – положительные корни уравнения: $\mu_n J_1(\mu_n) = Bi J_0(\mu_n)$; $i(\tau)$ – интенсивность сушки, выраженная из решения уравнения массопроводности для тела цилиндрической формы в виде

$$i(\tau) = -\frac{d\bar{u}}{d\tau} R_V \rho_0 = \left[\frac{\rho_0 k}{2R} \sum_{k=1}^{\infty} B_k \beta_k^2 \exp(-\beta_k^2 Fo_m) \right] (\bar{u}_n - u_p^*), \quad (2)$$

где

$$\bar{E} = \frac{\bar{u}(\tau) - u_p^*}{u_n - u_p^*} = \sum_{k=1}^{\infty} B_k \exp(-\beta_k^2 Fo_m), \quad (3)$$

$$B_k = \frac{4Bi_m^2}{\beta_k^2 (Bi_m^2 + \beta_k^2)}, \quad (4)$$

β_k – корни характеристического уравнения

$$\frac{J_0(\beta)}{J_1(\beta)} = \frac{\beta}{Bi_m}, \quad (5)$$

$R_V = R/2$ – отношение объема бесконечного цилиндрического тела к его поверхности, м; J_0, J_1 – функции Бесселя первого рода, нулевого и первого порядка соответственно.

В общем случае при сушке различных материалов перенос влаги в них в зависимости от структуры материала происходит за счет действия различных механизмов – как в жидкой, так и в парогазовой фазе в порах материала [16, 17]. Суммирование вкладов различных механизмов внутреннего изотермического массопереноса приводит к градиентному уравнению [17]

$$i = -k \rho_0 \text{grad } u, \quad (6)$$

по форме аналогичному уравнению диффузии Фика, в котором коэффициент пропорциональности называют коэффициентом массопроводности [17] или коэффициентом диффузии влаги [16]. Полиамид ПА-6 относится к числу непористых полимеров, перенос влаги в которых происходит по механизму активированной молекулярной диффузии [17, 18], поэтому коэффициент массопроводности k в данном случае следует трактовать как эффективный коэффициент диффузии влаги: $k \equiv D_e$.

Для обеспечения глубокой сушки полиамида необходимо использовать осушенный азот, влагосодержание которого в сушилке в расчете приняты равным $d_c = 0,001$ кг/(кг сух. азота)). Соответствующие ему значения равновесного влагосодержания материала при различных значениях температуры материала рассчитывали по уравнению [18]

$$u_p = 5,80 \cdot 10^{-2} \varphi_{\text{с.п}} \text{ при } \varphi < 0,5, \quad (7)$$

где u_p – в кг/кг; φ – в долях. Результаты вычислений u_p приведены в табл. 1.

Кинетику сушки рассчитывали по уравнению (3), которая при глубокой сушке гранул полиамида ПА-6 контролируется внутренней диффузией [17, 22], поэтому в уравнении (2) значения B_k и β_k находили как для внутренней задачи, соответствующей условию $Bi_m \rightarrow \infty$ [17]. Коэффициент теплоотдачи принимали равным $\alpha = 18,7$ Вт/(м² К) – с ориентацией на данные [15], число Био при этом равно: $Bi = 0,1$, что свидетельствует о внешней задаче теплообмена. При данном числе Био $\mu_{n=1} = 1,0245$, а $B_{n=1} = 0,9998$. Кинетику сушки рассчитывали зональным методом (для учета изменения коэффициента диффузии влаги в полиамиде ПА-6 в ходе процесса), принимая 3 концентрационные зоны и используя данные по коэффициенту диффузии влаги в этом материале, приведенные в [22].

Результаты расчетов кинетики приведены в табл. 1, из которых видно, что снижение температуры \bar{t}_{min} приводит к увеличению продолжительности сушки, оно происходит как вследствие снижения с температурой коэффициента диффузии влаги в полимере (коэффициента массопроводности), так и из-за увеличения равновесного влагосодержания.

Второй этап анализа заключался в расчете динамики нагрева прутка по уравнению (1) при различных значениях \bar{t}_{min} . В этих расчетах принимали, что прутки обдуваются сушильным агентом (азотом), имеющим температуру $t_c = 100$ °С, т.к. в ходе расчетов было установлено, что с использованием азота, имеющего комнатную температуру, невозможно обеспечить необходимое значение $\bar{t}_{\text{max}} = 140$ °С – из-за большого теплосъема с поверхности прутка обдувающим его потоком азота на стадии охлаждения в цикле «инфракрасный нагрев-охлаждение». Варьируемыми параметрами в этих расчетах были: продолжительность цикла $\tau_{\text{ц}}$ и продолжительность стадии нагрева в цикле $\tau_{\text{нар.ц}}$. Изменяя эти параметры, подбирали такой режим осциллирующего энергоподвода, который соответствовал бы выполнению условий $\bar{t}_{\text{max}} = 140$ °С и заданному значению \bar{t}_{min} . Далее, получив необходимые значения $\tau_{\text{ц}}$ и $\tau_{\text{нар.ц}}$, анализировали энергозатраты на инфракрасный нагрев, которые определяются продолжительностью сушки и продолжительностью работы излучателя.

Таблица 1

Результаты анализа процесса глубокой сушки прутка из полиамида ПА-6 при осциллирующем инфракрасном энергоподводе при $t_c = 100^\circ\text{C}$; $Bi_m \rightarrow \infty$

Table 1. The results of the analysis of the process of deep drying the rod of polyamide ПА-6 with oscillating infrared power supply at $t_c = 100^\circ\text{C}$; $Bi_m \rightarrow \infty$

№ расч вар-та	$\bar{t}_{\min}, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_{\text{ср.ц}}, ^\circ\text{C}$	Номер конц. зоны i	$(\bar{u}_{ni} - \bar{u}_{ki}) \cdot 10^2, \text{ кг}/(\text{кг сух. м-ла})$	$\bar{u}_{\text{ср.}i} \cdot 10^2, \text{ кг}/(\text{кг сух. м-ла})$	$k_i \cdot 10^{10}, \text{ м}^2/\text{с}$	$u_{pi} \cdot 10^2, \text{ кг}/(\text{кг сух. м-ла})$	$\tau_i \cdot 10^4, \text{ с}$	$\tau_c = \sum_1^3 \tau_i, \text{ с}$
1	135	137,5	1	4,5-2,5	3,5	1,11	0,00254	0,21	$2,80 \cdot 10^4$
			2	2,5-1,0	1,75	0,74		0,48	
			3	1,0-0,05	0,525	0,56		2,11	
2	130	135	1	4,5-2,5	3,5	1,00	0,00278	0,23	$3,13 \cdot 10^4$
			2	2,5-1,0	1,75	0,67		0,53	
			3	1,0-0,05	0,525	0,50		2,37	
3	125	132,5	1	4,5-2,5	3,5	0,90	0,00299	0,25	$3,49 \cdot 10^4$
			2	2,5-1,0	1,75	0,60		0,60	
			3	1,0-0,05	0,525	0,45		2,64	

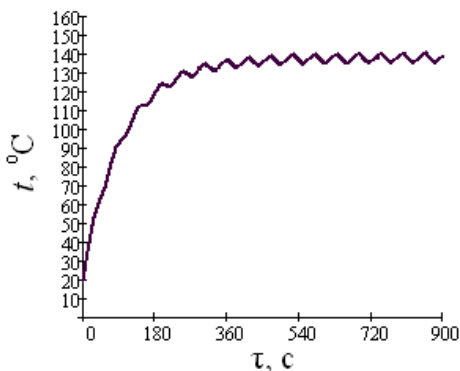


Рис. 1. Динамика осциллирующего инфракрасного нагрева прутка полиамида ПА-6 при $t_{\max} = 140^\circ\text{C}$, $t_{\min} = 135^\circ\text{C}$ ($\tau_{\text{ц}} = 55 \text{ с}$, $\tau_{\text{наг.ц}} = 30 \text{ с}$)

Fig. 1. Dynamics of oscillating infrared heating of PA-6 polyamide rod at $t_{\max} = 140^\circ\text{C}$, $t_{\min} = 135^\circ\text{C}$ ($\tau_{\text{ц}} = 55 \text{ s}$, $\tau_{\text{наг.ц}} = 30 \text{ s}$)

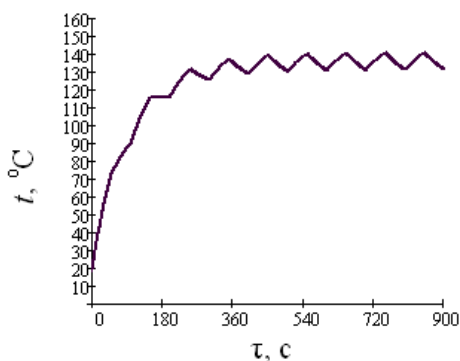


Рис. 2. Динамика осциллирующего инфракрасного нагрева прутка полиамида ПА-6 при $t_{\max} = 140^\circ\text{C}$, $t_{\min} = 130^\circ\text{C}$ ($\tau_{\text{ц}} = 100 \text{ с}$, $\tau_{\text{наг.ц}} = 50 \text{ с}$)

Fig. 2. Dynamics of oscillating infrared heating of PA-6 polyamide rod at $t_{\max} = 140^\circ\text{C}$, $t_{\min} = 130^\circ\text{C}$ ($\tau_{\text{ц}} = 100 \text{ s}$, $\tau_{\text{наг.ц}} = 50 \text{ s}$)

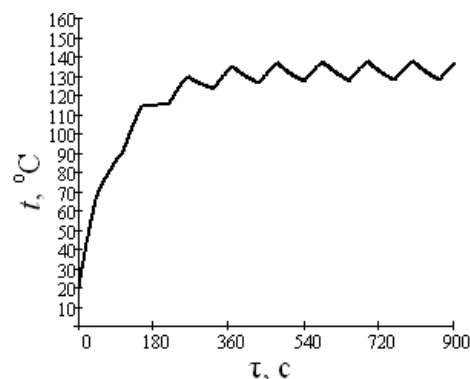


Рис.3. Динамика осциллирующего инфракрасного нагрева прутка полиамида ПА-6 при $t_{\max} = 140^\circ\text{C}$, $t_{\min} = 125^\circ\text{C}$ ($\tau_{\text{ц}} = 108 \text{ с}$, $\tau_{\text{наг.ц}} = 44 \text{ с}$)

Fig. 3. Dynamics of oscillating infrared heating of PA-6 polyamide rod at $t_{\max} = 140^\circ\text{C}$, $t_{\min} = 125^\circ\text{C}$ ($\tau_{\text{ц}} = 108 \text{ s}$, $\tau_{\text{наг.ц}} = 44 \text{ s}$)

Результаты расчетов динамики нагрева показаны на рис. 1-3. Как видно из графиков на этих рисунках, изменением варьируемых параметров $\tau_{\text{ц}}$ и $\tau_{\text{наг.ц}}$ при сохранении значений остальных параметров можно добиться желаемой амплитуды колебаний температуры материала в цикле при осциллирующей инфракрасной сушке. С уменьшением значения \bar{t}_{\min} длительность цикла $\tau_{\text{ц}}$ закономерно увеличивается, а длительность стали нагрева в нем $\tau_{\text{наг.ц}}$ проходит через максимум.

Используя полученные значения $\tau_{\text{ц}}$ и $\tau_{\text{наг.ц}}$, далее рассчитали общее время работы излучателей в процессе сушки $\tau_{\text{наг}}$ и потребленную ими электроэнергию E (было принято, что излучатели – электрические)

$$E = N\tau_{\text{наг}} = N\psi_{\text{ц}}\tau_{\text{с}}, \tag{8}$$

где $\tau_{\text{наг}} = \psi_{\text{ц}}\tau_{\text{с}}$.

Результаты расчетов величины E приведены в табл. 2, из них следует, что количество потребленной электроэнергии в функции от \bar{t}_{\min} проходит через максимум и имеет минимальное значение при $\bar{t}_{\min} = 135$ °С. Такой характер этой зависимости объясняется тем, что количество электроэнергии, потребленной на работу излучателя при проведении процесса сушки, определяется не только длительностью сушки, но и соотношением стадий нагрева и остывания в цикле. Поскольку количество тепловой энергии, расходуемой на нагрев сушильного агента в рассматриваемом процессе до температуры 100 °С, во всех рассмотренных режимах одинаково, то при прочих равных условиях с энергетической точки зрения наиболее выгодным является режим инфракрасного энергоподвода при $\bar{t}_{\min} = 135$ °С.

Таблица 2

Результаты расчета осциллирующего инфракрасного энергоподвода при глубокой сушке прутка полиамида ПА-6 при $t_{\max} = 140$ °С

Table 2. The results of calculation of the oscillating infrared power supply during the deep drying the rod of PA-6 Polyamide at $t_{\max} = 140$ °С

№ п/п	$\bar{t}_{\min}, ^\circ\text{C}$	$\tau_{\text{ц}}, \text{с}$	$\tau_{\text{наг.ц}}, \text{с}$	$\tau_{\text{с}}, \text{ч}$	$E, \text{кВт}\cdot\text{ч}$
1	135	55	30	7,78	4,24
2	130	100	50	8,69	4,35
3	125	108	44	9,69	3,95

ЛИТЕРАТУРА

- Ratti C., Mujumdar A.S. Infrared drying. In: Handbook of Industrial Drying. Ed. by A.S. Mujumdar. Boca Raton, FL: RC/Taylor & Francis. 2007. 1280 p.
- Bon J., Kudra T. Enthalpy-driven optimization of intermittent drying. *Drying Technol.* 2007. V. 25. N 4. P. 523-532. DOI: 10.1080/07373930701226880.
- Vaquiro H.A., Clemente G., Garcia-Perez J.V., Mulet A., Bon J. Enthalpy-driven optimization of intermittent drying of *Mangifera indica* L. *Chem. Eng. Res. Design.* 2009. V. 87. N 7. P. 885-898. DOI: 10.1016/j.cherd.2008.12.002.
- Soysal Y., Arslan M., Keskin M. Intermittent microwave-convective air drying of Oregano. *Food Sci. Technol. Internat.* 2009. V. 15. N 4. P. 397-406.
- Рудобашта С.П., Григорьев И.В. Импульсная инфракрасная сушка семян. *Промышл. теплотехника.* 2011. Т. 33. № 8. С. 85-90.
- Esturk O. Intermittent and continuous microwave-convective air-drying characteristics of sage (*Salvia officinalis*) leaves. *Food Bioproc. Technol.* 2012. V. 5. N 5. P. 1664-1673. DOI: 10.1007/s11947-010-0462-x.
- Zhao D., An K., Ding S., Liu L., Xu Z., Wang Z. Two-stage intermittent microwave coupled with hot-air drying of carrot slices: Drying kinetics and physical quality. *Food Bioproc. Technol.* 2014. V. 7. N 8. P. 2308-2318. DOI 10.1007/s11947-014-1274-1.

Поскольку рабочий объем сушилки пропорционален продолжительности сушки, то температурный режим сушки, соответствующий значению $\bar{t}_{\min} = 135$ °С, дает не только минимальные энергозатраты, но и приводит к наименьшему рабочему объему аппарата, а следовательно, и к наименьшим капитальным затратам, поэтому он выгоден и с этой точки зрения.

ВЫВОДЫ

Проведенные расчеты показывают, что методом численного моделирования процесса глубокой сушки гранулированных полимеров при комбинированном энергоподводе (непрерывном конвективном и осциллирующем инфракрасном), применяя математическую модель на основе уравнений (1) и (2), можно находить наиболее выгодный в отношении энергетических и капитальных затрат температурный режим инфракрасного нагрева.

Для процесса глубокой сушки гранул полиамида ПА-6 в форме прутка такому режиму соответствуют температуры: $\bar{t}_{\min} = 135$ °С, $\bar{t}_{\max} = 140$ °С.

Сушка гранул полиамида при осцилляции температуры материала в интервале от $\bar{t}_{\min} = 135$ °С до $\bar{t}_{\max} = 140$ °С не может быть осуществлена при чисто инфракрасном энергоподводе, необходим конвективный нагрев сушильного агента до достаточно высокой температуры (в расчетах 100 °С).

REFERENCES

- Ratti C., Mujumdar A.S. Infrared drying. In: Handbook of Industrial Drying. Ed. by A.S. Mujumdar. Boca Raton, FL: RC/Taylor & Francis. 2007. 1280 p.
- Bon J., Kudra T. Enthalpy-driven optimization of intermittent drying. *Drying Technol.* 2007. V. 25. N 4. P. 523-532. DOI: 10.1080/07373930701226880.
- Vaquiro H.A., Clemente G., Garcia-Perez J.V., Mulet A., Bon J. Enthalpy-driven optimization of intermittent drying of *Mangifera indica* L. *Chem. Eng. Res. Design.* 2009. V. 87. N 7. P. 885-898. DOI: 10.1016/j.cherd.2008.12.002.
- Soysal Y., Arslan M., Keskin M. Intermittent microwave-convective air drying of Oregano. *Food Sci. Technol. Internat.* 2009. V. 15. N 4. P. 397-406.
- Rudobashta S.P., Grigoriev I.V. Pulsed infrared seeds drying. *Promyshl. Teplotekh.* 2011. V. 33. N 8. P. 85-90 (in Russian).
- Esturk O. Intermittent and continuous microwave-convective air-drying characteristics of sage (*Salvia officinalis*) leaves. *Food Bioproc. Technol.* 2012. V. 5. N 5. P. 1664-1673. DOI: 10.1007/s11947-010-0462-x.
- Zhao D., An K., Ding S., Liu L., Xu Z., Wang Z. Two-stage intermittent microwave coupled with hot-air drying of carrot slices: Drying kinetics and physical quality. *Food Bioproc. Technol.* 2014. V. 7. N 8. P. 2308-2318. DOI 10.1007/s11947-014-1274-1.

8. **Kumar C., Karim M.A., Joardder M.U.H.** Intermittent drying of food products: A critical review. *J. Food Eng.* 2014. V. 121. P. 48–57.
9. **Rudobashta S.P., Kartashov E.M., Zuev N.A.** Heat and mass transfer in drying in an oscillating electromagnetic field. *Theoret. Found. Chem. Eng.* 2011. V. 45. N 6. P. 641–647. DOI: 10.1134/S0040579511050344.
10. **Kumar C., Joardder M.U.H., Farrell T.W., Millar G.J., Karim M.A.** Mathematical model for intermittent microwave convective drying of food materials. *Dry. technol.* 2016. V. 34. N 8. P. 962–973. DOI: 10.1080/07373937.2015.1087408.
11. **Grinchik N.N., Akulich P.V., Kuts P.S., Adamovich A.L., Kundas S.P.** Modeling of nonisothermal heat and moisture transfer in capillary-porous media in periodic microwave heating. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2007. V. 80. N 1. P. 1–10.
12. **Akulich P.V., Temruk A.V., Akulich A.V.** Modeling and experimental investigation of the heat and moisture transfer in the process of microwave-convective drying of vegetable materials. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2012. V. 85. N 5. P. 1034–1042.
13. **Rudobashta S., Zueva G., Zuev N.** Mathematical modeling and numerical simulation of oscillating infrared seeds drying process. *Dry. Technol.* 2014. V. 32. N 11. P. 1352–1359. DOI: 10.1080/07373937.2014.892508.
14. **Rudobashta S., Zueva G.** Drying of seeds through oscillating infrared heating. *Dry. Technol.* 2016. V. 34. N 5. P. 505–515. DOI: 10.1080/07373937.2015.1060997.
15. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Kartashov E.M.** Heat and mass transfer when drying a spherical particle in an oscillating electromagnetic field. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2016. V. 50. N 5. P. 718–729. DOI: 10.1134/S0040579516050365.
16. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. М.: Высшая школа. 1967. 599 с.
17. **Рудобашта С.П.** Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия. 1980. 248 с.
18. **Рудобашта С.П., Карташов Э.М.** Диффузия в химико-технологических процессах. М.: КолосС. 2015. 478 с.
19. **Лыков А.В.** Теория сушки. М.: Энергия. 1968. 472 с.
20. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Kartashov E.M.** Heat and mass transfer in the drying of a cylindrical body in an oscillating magnetic field. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2018. V. 91. N 1. P. 227–236. DOI: 10.1007/s10891-018-1740-0.
21. **Rudobashta S.P., Dmitriev V.M.** Kinetics and apparatus-technological arrangement of convective drying of disperse polymer materials. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2005. V. 78. N 3. P. 463–473.
8. **Kumar C., Karim M.A., Joardder M.U.H.** Intermittent drying of food products: A critical review. *J. Food Eng.* 2014. V. 121. P. 48–57.
9. **Rudobashta S.P., Kartashov E.M., Zuev N.A.** Heat and mass transfer in drying in an oscillating electromagnetic field. *Theoret. Found. Chem. Eng.* 2011. V. 45. N 6. P. 641–647. DOI: 10.1134/S0040579511050344.
10. **Kumar C., Joardder M.U.H., Farrell T.W., Millar G.J., Karim M.A.** Mathematical model for intermittent microwave convective drying of food materials. *Dry. technol.* 2016. V. 34. N 8. P. 962–973. DOI: 10.1080/07373937.2015.1087408.
11. **Grinchik N.N., Akulich P.V., Kuts P.S., Adamovich A.L., Kundas S.P.** Modeling of nonisothermal heat and moisture transfer in capillary-porous media in periodic microwave heating. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2007. V. 80. N 1. P. 1–10.
12. **Akulich P.V., Temruk A.V., Akulich A.V.** Modeling and experimental investigation of the heat and moisture transfer in the process of microwave-convective drying of vegetable materials. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2012. V. 85. N 5. P. 1034–1042.
13. **Rudobashta S., Zueva G., Zuev N.** Mathematical modeling and numerical simulation of oscillating infrared seeds drying process. *Dry. Technol.* 2014. V. 32. N 11. P. 1352–1359. DOI: 10.1080/07373937.2014.892508.
14. **Rudobashta S., Zueva G.** Drying of seeds through oscillating infrared heating. *Dry. Technol.* 2016. V. 34. N 5. P. 505–515. DOI: 10.1080/07373937.2015.1060997.
15. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Kartashov E.M.** Heat and mass transfer when drying a spherical particle in an oscillating electromagnetic field. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2016. V. 50. N 5. P. 718–729. DOI: 10.1134/S0040579516050365.
16. **Lykov A.V.** Thermal Conduction Theory. М.: Vyssh. Shk. 1967. 599 p. (in Russian).
17. **Rudobashta S.P.** Mass Transfer in Solid Phase Systems. М.: Khimiya. 1980. 248 p. (in Russian).
18. **Rudobashta S.P., Kartashov E.M.** Diffusion in chemical-technological processes. М.: KolossS. 2015. 478 p. (in Russian).
19. **Luikov A.V.** Theory of Drying. М.: Energiya. 1968. 472 p. (in Russian).
20. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Kartashov E.M.** Heat and mass transfer in the drying of a cylindrical body in an oscillating magnetic field. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2018. V. 91. N 1. P. 227–236. DOI: 10.1007/s10891-018-1740-0.
21. **Rudobashta S.P., Dmitriev V.M.** Kinetics and apparatus-technological arrangement of convective drying of disperse polymer materials. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2005. V. 78. N 3. P. 463–473.

Поступила в редакцию 20.03.2019
Принята к опубликованию 16.09.2019

Received 20.03.2019
Accepted 16.09.2019