

СТАНИСЛАВ РУДОБАШТА<sup>1</sup>, ГАЛИНА ЗУЕВА<sup>2</sup>, НИКОЛАЙ ЗУЕВ<sup>1</sup>

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ – СТИМУЛЯЦИИ СЕМЯН И АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА

### PULSED INFRARED SEEDS DRYING – STIMULATION AND ITS HARDWARE DESIGN

#### Аннотация

С целью совершенствования энергосберегающей импульсной ИК технологии сушки-стимуляции семян сельскохозяйственных культур, обеспечивающей высокое качество посевного материала, разработана математическая модель тепломассопереноса при сушке в осциллирующем электромагнитном поле, адекватная реальному процессу. Даны рекомендации по аппаратурному оформлению процесса импульсной инфракрасной сушки-стимуляции семян сельскохозяйственных культур, типу излучателей и плотности теплового потока. Разработана методика инженерного расчёта сушилки.

*Ключевые слова: инфракрасная сушка, математическая модель тепломассопереноса, стимуляция семян*

#### Abstract

In order to improve energy-saving pulsed infrared drying - stimulation technology of crop seeds, providing their high quality, the mathematical model of heat- and mass transfer in drying in an oscillating electromagnetic field is developed. The model is adequate to the real process. Recommendations on the hardware design of process of a pulsed infrared drying-stimulation of crop seeds, as well as on radiators type and heat flux are given. The method of engineering calculation of the dryer is developed.

*Keywords: heat treatment processes, heat conductivity problem, fibrous materials*

<sup>1</sup> Д.т.н., профессор Станислав Павлович Рудобашта, аспирант Николай Александрович Зуев, Московский государственный агроинженерный университет.

<sup>2</sup> Д.ф.-м.н., профессор Галина Альбертовна Зуева, Ивановский государственный химико-технологический университет.

## 1. Введение

Сушку семян нужно осуществлять таким образом, чтобы не только сохранить их посевные качества, но и по возможности их улучшить. Эффективным способом стимуляции семян, т.е. улучшения их посевных качеств – повышения энергии прорастания и всхожести, является их импульсная инфракрасная сушка (ИК-сушка) которая может проводиться как после сбора семян, так и непосредственно перед посевом, когда семена замачиваются и подвергаются импульсной ИК-сушке исключительно с целью стимуляции [1].

Сушка материалов в электромагнитном поле применяется во многих случаях [2]. При таком способе сушки необходим осциллирующий режим, при котором стадии облучения материала чередуются со стадиями обдува материала газовой средой с невысокой температурой – во избежание перегрева материала. Он позволяет поддерживать температуру высушиваемого материала в заданных пределах и тем самым сохранять его высокие посевные качества. При проведении процесса сушки термолabileного материала в осциллирующем электромагнитном поле важно знать динамику температурного поля материала для того, чтобы можно было выбрать правильный технологический режим и оценить возникающие в материале температурные градиенты, способные вызывать термодиффузию и молярный перенос влаги.

Построенная математическая модель позволяет рассчитывать температурное поле, развивающееся в слое семян при осциллирующей ИК-сушке, и в совокупности с решением уравнения массопроводности осуществлять инженерный расчёт сушилки.

## 2. Математическая модель

Для получения информации о температурном поле материала, высушиваемом в осциллирующем электромагнитном поле (это может быть инфракрасная сушка или сушка материала токами высокой или сверхвысокой частоты) ниже сформулирована и аналитически решена задача взаимосвязанного тепломассопереноса при сушке плоского материала (пластина или плоский слой высушиваемого материала), обдуваемого потоком газа (сушильного агента). Предполагаем, что:

- 1) тело имеет форму неограниченной пластины толщиной  $R$  и находится на поверхности, непроницаемой для потоков теплоты и влаги;
- 2) противоположная поверхность тела участвует в процессе тепломассобмена с потоком газа по законам тепло- и массотдачи;
- 3) термодиффузия и молярный перенос влаги в теле отсутствуют (это условие правомерно, поскольку рассматривается низкотемпературная сушка термолabileных материалов);
- 4) при формулировке задачи теплопроводности принимаем допущение об отсутствии внутренних фазовых превращений (сток теплоты на испарение влаги имеет место у поверхности тела);
- 5) поглощение лучистой энергии происходит согласно закону Бугера-Ламберта-Бера;

- 6) коэффициент проницаемости тела равен нулю;
- 7) циклы «нагрев-остывание» тела одинаковы по продолжительности с одинаковыми значениями в них длительностей стадий нагрева и остывания;
- 8) все теплофизические и электрофизические характеристики материала, кинетические характеристики процесса, а также температура сушильного агента и концентрация пара в нём постоянны.

Математическая формулировка задачи об одностороннем нагреве пластины в осциллирующем электромагнитном поле с учётом стока теплоты на испарение влаги имеет следующий вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{1}{c \cdot \rho} \cdot \mu^* \cdot q_0 \cdot \exp[-\mu^*(R-x)] \cdot A \cdot f_1(\tau), \quad \tau > 0, \quad 0 < x < R \quad (1)$$

$$t(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = f_2(x), \quad 0 \leq x \leq R \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \tau > 0 \quad (3)$$

$$\lambda \cdot \left. \frac{\partial t}{\partial \tau} \right|_{x=R} = \alpha(t_s - t(R)) - (r^* \cdot i(\tau)), \quad \tau > 0 \quad (4)$$

где  $a, c, \rho_0, \mu^*, q_0, A, \lambda, \alpha, R, t_s, r^* = \text{const}$ ;  $f_1(\tau)$  – единичная периодическая функция, отражающая цикличность облучения;  $t_s$  – температура внешней среды,  $c$ ;  $x$  – координата, направленная от основания пластины к её поверхности,  $m$ ;

$$f_1(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \{ \eta(\tau - n\tau_c) - \eta[\tau - (n\tau_c + \tau_d)] \} \quad (5)$$

$\tau_c$  – длительность цикла,  $\tau_d$  – длительность работы ИК – излучателя в цикле,  $\tau_0$  – длительность отключения ИК – излучателя в цикле,  $\eta(\tau)$  – единичная функция Хевисайда (рис.1).

При  $n = 0$  имеем один цикл:

$$f_1(\tau) = \eta(\tau) - \eta(\tau - \tau_d)$$

Здесь  $t(x, \tau)$  – температура пластины,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $x$  – декартова координата для пластины,  $m$ ;  $\tau$  – время,  $s$ ;  $t_s$  – температура среды,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $f_2(x)$  – начальная температура пластины,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho$  – плотность влажного материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $a$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ ;  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $c$  – теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ ;  $\mu^*$  – коэффициент экстинкции,  $1/\text{м}$ ;  $q_0$  – плотность теплового потока, падающего на слой,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $R^*$  – коэффициент отражения;  $r^*$  – теплота парообразования,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $i(\tau)$  – интенсивность сушки,  $(\text{кг испаренной ваги})/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Она находится из решения задачи массопроводности [3] и для рассматриваемого случая (испарение из пластины) может быть представлена выражением

$$\begin{aligned} i(\tau) &= R \cdot \rho_0 (u_n - u_p) \cdot \frac{a}{R^2} \cdot Lu \sum_{k=1}^{\infty} \beta_k^2 \cdot B_k \cdot \exp(-\beta_k^2 \cdot Lu \cdot Fo) = \\ &= \rho_0 (u_n - u_p) \frac{a}{R} \cdot Lu \sum_{k=1}^{\infty} \beta_k^2 \cdot B_k \cdot \exp(-\beta_k^2 \cdot Lu \cdot Fo) \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\beta_k$  – корни характеристического уравнения

$$\operatorname{ctg} \beta_k = \frac{\beta_k}{Bi_m}$$

$Bi_m = \frac{\beta \cdot R}{k \cdot \rho_0 \cdot A_{p,n}}$  – число Био массообменное,  $\beta$  – коэффициент массотдачи, м/с;

$k$  – коэффициент массопроводности, м<sup>2</sup>/с;  $\rho_0$  – плотность абсолютно сухого материала, кг/м<sup>2</sup>;  $A_{p,n}$  – коэффициент распределения функции концентрационного фазового равновесия у поверхности материала, (кг/кг)/(кг/м<sup>3</sup>);  $R$  – толщина пластины, м;  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $u_H$  – начальное влагосодержание материала, (кг влаги)/(кг сухого материала);  $u_p$  – равновесное влагосодержание материала (кг влаги)/(кг сухого материала);

$Fo = \frac{a \cdot \tau}{R^2}$  – число Фурье;  $Lu = \frac{k}{a}$  – число

Лыкова;  $B_k$  – предэкспоненциальный множитель, определяемый выражением:

$$B_k = \frac{2 \cdot Bi_m^2}{\mu_k^2 \cdot (Bi_m^2 + \mu_k^2 + Bi_m)} \quad (7)$$

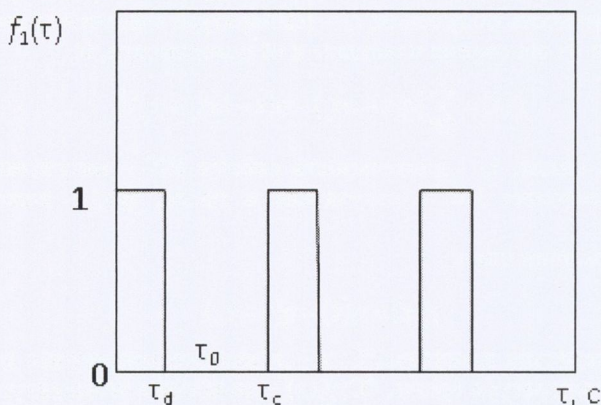


Рис. 1. Периодическая функция  $f_1(\tau)$  в уравнении (5)

Fig. 1. Periodic function  $f_1(\tau)$  in Eq. (5)

Поставленная задача решена нами аналитически методом интегральных преобразований Карташова [4]. В частности, при  $t(x, \tau)|_{\tau=0} = t_H = \text{const}$ ,  $0 \leq x \leq R$  искомое решение имеет вид:

$$t(x, \tau) = t_s + W(\xi, Fo) \cdot (t_H - t_s) - (r^* / \alpha) \cdot i(\tau) \quad (8)$$

Здесь

$$\begin{aligned}
 W(\xi, Fo) = & 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + Bi^2) \cdot \cos \mu_n \cdot \xi}{\mu_n^2 + Bi^2 + Bi} \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo} \cdot \int_0^1 f_0(\xi) \cdot \cos \mu_n \cdot \xi \, d\xi + \\
 & + 2 \cdot \theta_0 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + Bi^2) \cdot A_n(\mu_0^*) \cdot \cos \mu_n \cdot \xi}{\mu_n^2 + Bi^2 + Bi} \cdot \int_0^{Fo} e^{-\mu_n^2 (Fo-y)} \cdot f_1^*(y) \, dy + \\
 & + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + Bi^2) \cdot A_n(0) \cdot \cos \mu_n \cdot \xi}{\mu_n^2 + Bi^2 + Bi} \cdot \int_0^{Fo} e^{-\mu_n^2 (Fo-y)} \cdot \phi_0(y) \, dy
 \end{aligned} \quad (9)$$

$$f_0(\xi) = \frac{(t_H - t_s) + (r^* / \alpha) \cdot i(0)}{t_H - t_s} = N_0$$

$$f_1^*(Fo) = \sum_{n=0}^{\infty} \{ \eta \cdot (Fo - n \cdot \tau_c^*) - \eta \cdot (Fo - (n \cdot \tau_c^* + \tau_d^*)) \};$$

$$\zeta = \frac{x}{R}; \quad Fo = \frac{a \cdot \tau}{R^2}; \quad \mu = \mu \cdot R; \quad Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda}; \quad \theta_0 = \frac{\mu^* \cdot q_0 \cdot (1 - R^*) \cdot R^2}{\lambda \cdot (t_H - t_c)};$$

$$A_n(\mu_0^*) = \int_0^1 e^{-\mu_0^* \cdot \xi} \cdot \cos(\mu \cdot \xi) \, d\xi$$

$$\begin{aligned}
 \varphi(Fo) = & \frac{R^2}{a \cdot (t_H - t_s)} \frac{d\varphi(\tau)}{d\tau} = \frac{R^2 \cdot r^*}{a \cdot \alpha \cdot (t_H - t_s)} \frac{di(\tau)}{d\tau} = \\
 = & \frac{r^* \cdot \rho_0 \cdot (u_H - u_p) \cdot a \cdot Lu^2}{\alpha \cdot (t_H - t_s) \cdot R} \cdot \sum_{K=1}^{\infty} \beta_K^2 \cdot B_K \cdot \exp(-\beta_K^2 \cdot Lu \cdot Fo)
 \end{aligned} \quad (10)$$

Все ряды, входящие в решение, сходятся абсолютно и равномерно при всех  $0 \leq \xi \leq 1$  и обладают быстрой сходимостью. Для расчетов можно взять в (9) первый член при  $n = 1$ .

Средняя температура равна:

$$\begin{aligned}
 \overline{W}(Fo) = & \int_0^1 W(\xi, Fo) \, d\xi = 2 \cdot N_0 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + Bi^2) \cdot A_n(0) \cdot \sin \mu_n}{\mu_n \cdot (\mu_n^2 + Bi^2 + Bi)} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo) + \\
 & + 2 \cdot \theta_0 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + Bi^2) \cdot A_n(\mu_0^*) \cdot \Psi_n(Fo) \cdot \sin \mu_n}{\mu_n^3 \cdot (\mu_n^2 + Bi^2 + Bi)} + \\
 & + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + Bi^2) \cdot A_n(0) \cdot D_n \cdot \sin \mu_n}{\mu_n^4 \cdot (\mu_n^2 + Bi^2 + Bi)} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo)
 \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\Psi_n(Fo) = \int_0^{Fo} f_1^*(y) \cdot \exp(-\mu_n^2 (Fo - y)) \, dy$$

### 3. Численный анализ полученного решения

Полученное решение задачи нагрева материала, высушиваемого в осциллирующем электромагнитном поле, было проанализировано путем расчета динамики инфракрасного нагрева пластины толщиной  $R = 0,9 \cdot 10^{-3}$  м применительно к условиям осциллирующей (импульсной) инфракрасной сушки, экспериментально исследованной в [5] – с целью сопоставления результатов расчета и эксперимента. В расчетах было принято:

- 1) открытая поверхность пластины, обращенная к источнику излучения, обдувается потоком воздуха с температурой  $t_s = 20^\circ\text{C}$  и влажностью  $d = 0,01$  кг/(кг сушильного агента), со скоростью  $= 1,5$  м/с;
- 2) начальная температура материала:  $t_n = 18^\circ\text{C}$ ;
- 3) длина пластины по направлению движения воздуха  $l = 0,12$  м.

Для этих условий были рассчитаны коэффициенты тепло- и массоотдачи для условий конвективной сушки в первом периоде – по критериальным уравнениям А. В. Нестеренко [6]

$$Nu = 0,51 \cdot Re^{0,61} \cdot Pr^{0,33} \cdot Gu^{0,175} \quad (13)$$

$$Sh = 0,49 \cdot Re^{0,61} \cdot Sc^{0,33} \cdot Gu^{0,135} \quad (14)$$

где  $Nu$ ,  $Re$ ,  $Pr$ ,  $Sc$ ,  $Gu$  – числа Нуссельта, Рейнольдса, Прандтля, Шмидта, Гухмана, соответственно.

В результате было получено:  $\alpha = 13,8$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\beta = 0,015$  м/с. Расчеты выполняли при этих значениях коэффициентов тепло- и массоотдачи, считая их неизменными в процессе сушки – для материала, имеющего следующие характеристики, типичные для семян [7]:  $\rho = 680$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_0 = 470$  кг/м<sup>3</sup>;  $a = 2,1 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda = 0,33$  Вт/(м·К);  $k = 4,5 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с;  $R^* = 0,1$ ;  $u_n = 0,45$  кг/кг;  $u_p = 0,037$  кг/кг;  $\mu^* = 1000$  л/м. В расчетах было принято также (с ориентацией на условия сушки в [4]):  $q_0 = 1810$  Вт/м<sup>2</sup>;  $r^* = 2437 \cdot 10^3$  Дж/кг. Это значение  $r^*$  равно теплоте парообразования (без учета теплоты адсорбции) при средней предварительно принятой в расчете температуре материала  $37^\circ\text{C}$ , которая в цикле изменяется от  $t_{min}$  до  $t_{max}$ ;  $\tau_d = 15$  с;  $\tau_c = 60$  с. С использованием приведенных выше данных был рассчитан коэффициент  $A_{p,n}$  по методике, описанной в [3], и далее число  $Bi_m$ . Они оказались равными:  $A_{p,n} = 3,42$ ;  $Bi_m = 187$ . Полученное значение числа  $Bi_m$  свидетельствует о том, что в рассматриваемом процессе реализуется чисто внутридиффузионный кинетический режим и, следовательно, параметры  $B_k$  и  $\beta_k$  в уравнении (6) определяются выражениями [3]:  $\beta_k = (2 \cdot k - 1) \cdot \pi / 2$ ;  $B_k = 2 / \beta_k^2$  которые и были использованы в расчете.

Расчет выполняли с использованием программы „Mathcad”, его результаты приведены на рис. 2, из которого видно, что уравнение (8) описывает осциллирующий процесс инфракрасной сушки рассматриваемого тела. Температура на его поверхности колеблется в пределах от  $t_{min}$  до  $t_{max}$ . Значения  $t_{min}$  и  $t_{max}$  несколько изменяются в ходе процесса из-за изменения скорости сушки. Изменение температуры по толщине пластины, которое в данном случае незначительно. Это объясняется тем, что число Био при принятых в расчете параметрах мало ( $Bi = 0,038$ ), и некоторое изменение температуры по толщине пластины обусловлено, в основном, неравномерным тепловыделением – в соответствии с законом Бугера–Ламберта–Бера.

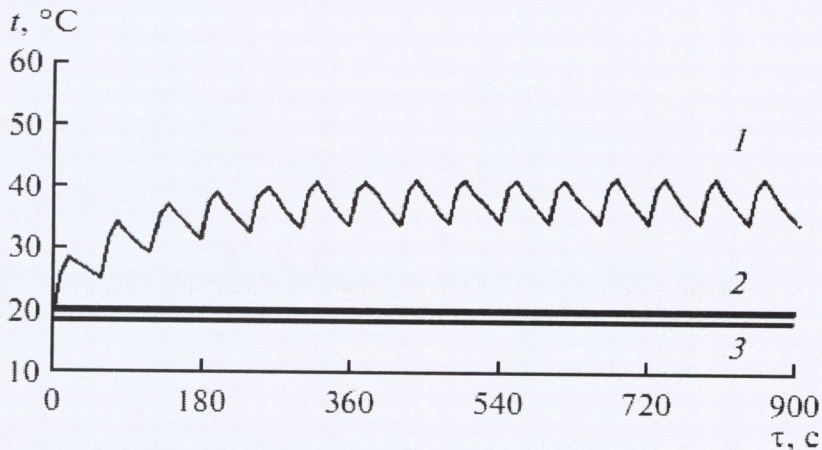


Рис. 2. Расчетное изменение температуры поверхности пластины во времени при осциллирующей инфракрасной сушке: 1 -  $t|_{x=R} = f(\tau)$ , 2 -  $t_s = 20^\circ\text{C}$ , 3 -  $t_n = 18^\circ\text{C}$

Fig. 2. Calculated variation of the surface temperature of a plate with time in oscillating infrared drying: 1 -  $t|_{x=R} = f(\tau)$ , 2 -  $t_s = 20^\circ\text{C}$ , 3 -  $t_n = 18^\circ\text{C}$

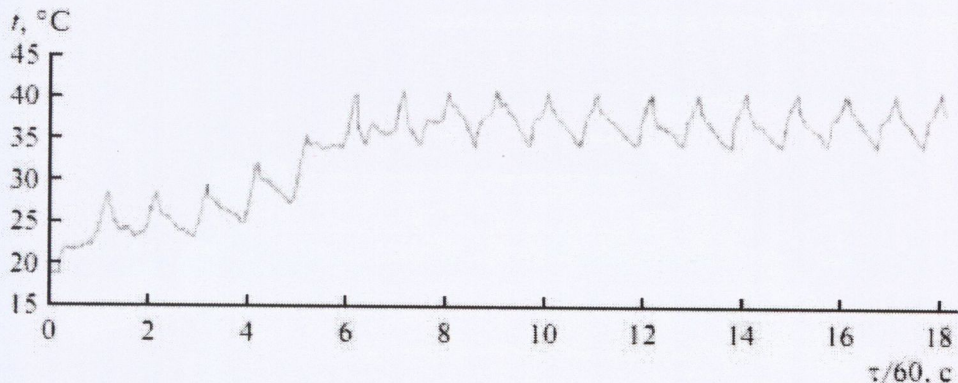


Рис. 3. Экспериментальное изменение температуры поверхности семян огурца сорта «Водолей» во времени при осциллирующей инфракрасной сушке монослоя семян ( $q_0 = 1810 \text{ Вт/м}^2$ ;  $V = 1,8 \text{ м/с}$ ; излучатели – лампы «OSRAM Sicatherm»;  $u_0 = 0,51 \text{ кг/(кг сухого материала)}$ ;  $t_{\max} = 40^\circ\text{C}$ ;  $t_{\min} = 34^\circ\text{C}$ ) [5]

Fig. 3. Experimental variation of the surface temperature of «Vodolei» cucumber seeds with time in oscillating infrared drying of a monolayer of seeds ( $q_0 = 1810 \text{ W/m}^2$ ,  $V = 1.8 \text{ m/s}$ ; the radiators are OSRAM Siccatherm lamps,  $u_0 = 0.51 \text{ kg/(kg of dry material)}$ ,  $t_{\max} = 40^\circ\text{C}$  and  $t_{\min} = 34^\circ\text{C}$ ) [5]

Полученные расчетные температурные кривые были сопоставлены с результатами экспериментальных измерений (рис. 3). На рис. 3 показано изменение температуры поверхности семян огурца, высушиваемых в плотном монослое инфракрасным способом в осциллирующем (импульсном) режиме при одновременном продольном обдуве открытой поверхности семян холодным потоком воздуха с температурой  $20^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $1,8$  м/с [5]. С помощью регулятора температур поверхности семян в опытах поддерживалась в интервале  $34 \div 40^{\circ}\text{C}$ .

Отметим, что семена огурца имеют плоскую (пластинчатую) форму и среднюю толщину  $R = 0,9 \cdot 10^{-3}$  м. Согласно проведенным в [5] измерениям, при средней температуре семян в опытах  $37^{\circ}\text{C}$  на концентрационной зависимости  $k = f(u)$ , коэффициент массопроводности имеет минимальное значение  $k = 4,5 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с; равновесное влагосодержание материала при указанной выше температуре поверхности семян и параметрах воздушного потока, обдувающего семена равных  $t_s = 20^{\circ}\text{C}$  и  $d = 0,01$  кг/(кг сушильного агента) составляет  $u_p = 0,037$  кг/(кг сухого материала). Таким образом, условия эксперимента соответствовали условиям расчета.

Как показывает сопоставление рис. 2 и 4, результаты расчета согласуются с опытными данными и, следовательно, полученные в данной работе аналитические зависимости могут быть использованы для расчета и численного анализа температурного поля в процессе импульсной электромагнитной сушки.

#### 4. Аппаратурное оформление процесса

На рис. 4 показана схема установки, на которой предлагается осуществлять импульсную ИК-сушку или стимуляцию семян.

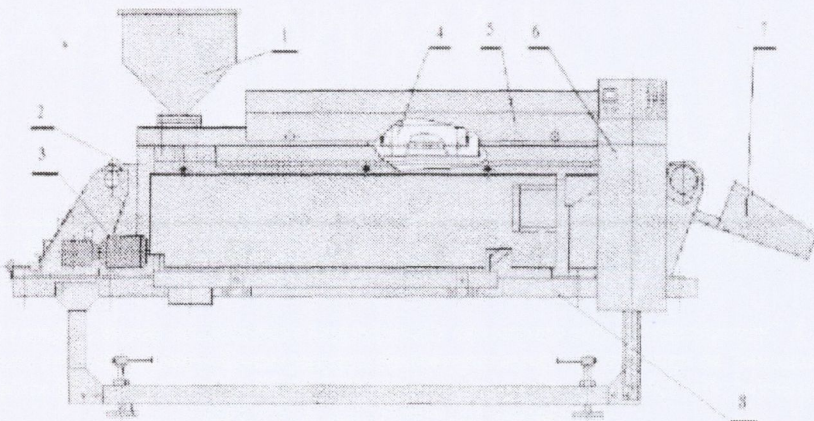


Рис. 4. Общий вид установки для импульсной ИК-сушки или стимуляции семян

Fig. 4. General view of installation for pulse IR-drying or stimulation of seeds



Сушилка содержит: загрузочный бункер-питатель с гребенкой 1, улучшающий равномерное распределение семян на транспортной ленте; ленточный транспортер 2, представляющий собой сетку из жаропрочной нержавеющей стали; мотор-редуктор 3 с частотным регулированием скорости движения ленты с высушиваемыми семенами; блоки ИК-излучателей 4; кожух (экран) 5; пульт управления 6; сыпной лоток 7, раму 8.

Семена из загрузочного бункера-питателя равномерно распределяется на сетке ленточного транспортера, слоем в несколько семян, транспортёр движется под блоками ИК-излучателей, работающих в импульсном режиме, в теплоизолированной камере, которая снизу ограничена лентой транспортера. Слой семян в сушилке обдувается продольным потоком атмосферного воздуха. Для расширения возможностей сушилки блоки ИК-излучателей выполнены таким образом, чтобы можно было изменять шаг и высоту подвеса ламп над высушиваемым материалом. Сушилка оснащается информационно-управляющей системой, которая позволяет реализовать выбранный импульсный режим сушки-стимуляции семян и, при необходимости, изменять температурный режим сушки. Контроль за высушиваемым материалом осуществляется с помощью приборов, участвующих в процессе импульсной ИК-сушки, которые регулируют температуру материала в пределах  $t_{min} \dots t_{max}$ .

В качестве излучателей рекомендуется использовать лампы OSRAM Siccatherm, т.к. из числа исследованных в [8] излучателей (лампы OSRAM Siccatherm, трубчатые лампы накаливания КГТ-220 ÷ 600, керамические излучатели ELCER ECS1) эти лампы, имеющие максимум излучения на длине волны  $\sim 1,1$  мкм, обеспечивают наибольший стимулирующий эффект семян. При организации процесса лампы следует располагать таким образом, чтобы плотность теплового потока, поступающего на семена, составляла  $\sim 1900$  Вт/м<sup>2</sup>, как обеспечивающая максимальную всхожесть и энергию прорастания семян в интервале приемлемых энергозатрат на проведение процесса [8].

Применительно к данному аппаратурному оформлению процесса разработана методика инженерного расчёта процесса сушки. Она заключается в том, что задаются начальным  $u_n$  и конечным  $u_k$  влагосодержаниями материала, величинами  $\tau_c$ ,  $\tau_d$ ,  $\tau_0$ ,  $t_n$ ,  $t_s$  и рассчитывают циклический процесс тепломассообмена при ИК-сушке, используя зависимости (6) и (11). Значения теплофизических характеристик выбирают по средним значениям влагосодержаний и температур семян в циклах. Расчёт ведут до достижения требуемого конечного влагосодержания материала  $u_k$ , определяя продолжительность сушки.

Реализация данного метода требует знания коэффициента массопроводности, значения которого для семян ввиду трудности его экспериментального определения, весьма ограничены. В связи с этим были проведены эксперименты по его определению, в результате которых были получены значения коэффициента массопроводности для семян следующих культур: лук, горчица, перец, петрушка – в функции от влагосодержания и температуры (будут приведены в докладе). Расчёты кинетики сушки по данной модели показали, что она обеспечивает требуемую для инженерной практики точность: относительная погрешность в определении времени сушки составляет  $\pm 8 \dots 10\%$ .

## 5. Заключение

Полученное аналитическое решение задачи динамики нагрева пластины в условиях осциллирующей электромагнитной сушки в совокупности с решением задачи массопроводности и зависимости, следующие из него, позволяют рассчитать температурное поле в материале, изменение среднеобъемной температуры тела во времени и градиент температуры (например, у поверхности материала), что несет в себе информацию, существенную для организации процесса импульсной ИК-сушки термолабильных материалов. Процесс непрерывной импульсной ИК-сушки или стимуляции семян предложено проводить в ленточной сушилке с применением в качестве излучателей ламп OSRAM Siccatherm при создании ими плотности теплового потока  $1900 \text{ Вт/м}^2$ . Применительно к данной конструкции сушилки разработана инженерная методика её кинетического расчёта и получены данные по коэффициентам массопроводности ряда семян, необходимые для её реализации.

## Литература

- [1] Зуев Н. А., Рудобашта С. П., Зотова Е. Ю., Зуева Г. А.: Вестник ФГОУ ВПО МГАУ, Агроинженерия, 2(47), (2011), 7-10.
- [2] Kudra T., Strumillo Cz.: *Thermal Processing of Bio-materials*, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam 1998.
- [3] Рудобашта С. П.: *Массоперенос в системах с твёрдой фазой*, Химия, Москва 1980.
- [4] Карташов Э. М.: *Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел*, Высш. школа, Москва 2001.
- [5] Григорьев И. В.: *Импульсная инфракрасная сушка семян овощных культур, нетрадиционных и редких растений*. Дис. к.т.н.: 05.20.02, МГАУ, Москва 2010.
- [6] Нестеренко А. В.: *Основы термодинамических расчётов вентиляции и кондиционирования воздуха*, Высш. школа, Москва 1952.
- [7] *Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочное пособие*, Под ред. А. С. Гинзбурга, Пищевая промышленность, Москва 1975.
- [8] Рудобашта С. П., Григорьев И. В.: Промышленная теплотехника, 33, №8, (2011), 85-90.