



УДК 536.24

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО НАГРЕВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.П. Рудобашта

Станислав Павлович Рудобашта

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

E-mail: rudobashta@mail.ru



Рассмотрена глубина проникновения электромагнитного поля в материалы в зависимости от его частоты. Обсуждены работы по математическому моделированию процессов электромагнитного нагрева и сушки материалов в инфракрасном и сверхвысокочастотном диапазонах. Указаны преимущества и недостатки аналитических и численных методов решения задач электромагнитного нагрева изделий. Отмечено, что электромагнитный нагрев влажных строительных материалов часто сопровождается испарением из них влаги, что следует учитывать при математическом моделировании процесса их электромагнитного нагрева. Выделены роль тепловой обработка бетона, которая стала важной стадией технологического процесса в производстве строительных изделий, значимость электротермической обработки железобетонных изделий и электромагнитных методов нагрева - в различных диапазонах частот. Представлена аналитическая математическая модель электромагнитного нагрева пластины под воздействием потока излучения, проникающего в тело по закону Бугера. Она учитывает сток теплоты на испарение влаги, происходящий у поверхности пластины, и ее конвективный теплообмен с внешней газовой средой. Модель проанализирована на соответствие реальному процессу в условиях инфракрасного нагрева путем сопоставления расчетных и экспериментальных термограмм. Показана ее адекватность реальному процессу. На основе этой модели показана возможность выбора методом численного компьютерного анализа необходимого технологического режима электромагнитного нагрева. Рассмотренная математическая модель рекомендована к практическому применению в строительной технологии.

Ключевые слова: электромагнитный нагрев, строительные материалы, математическое моделирование, динамика нагрева

Для цитирования:

Рудобашта С.П. Математическое моделирование процессов электромагнитного нагрева строительных материалов. *Умные композиты в строительстве*. 2021. Т. 2. №. 3. С. 46-57 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_3_46



UDC 536.24

MATHEMATICAL MODELING OF ELECTROMAGNETIC HEATING PROCESSES OF BUILDING MATERIALS

S.P. Rudobashta

Stanislav P. Rudobashta

Department of Heat Engineering, Hydraulics and Power Supply of Enterprises, Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 127550, Russia
E-mail: rudobashta@mail.ru



The paper considers the depth of penetration of electromagnetic fields into materials as a function of frequency. The author discusses the works on mathematical modelling of electromagnetic heating and drying of materials in the infrared and ultra-high frequency ranges. The article indicates the advantages and disadvantages of analytical and numerical methods for solving problems of electromagnetic product heating. It is noted that the electromagnetic heating of moist building materials is often accompanied by evaporation of moisture. It should be taken into account in the mathematical modelling of their electromagnetic heating process. Further the article highlights the role of heat treatment of concrete, which has become an important stage of the technological process of building materials production. The electro-thermal treatment of reinforced concrete products and electromagnetic heating methods in different frequency ranges are relevant. The article presents the analytical mathematical model of electromagnetic heating of a plate under the influence of a radiation flux penetrating the body according to Booger's law. It takes into account the heat flow to the evaporation of moisture occurring at the surface of the plate, and its convective heat and mass exchange with the external gas medium. We analyse the model for consistency with the real process under infra-red heating conditions by comparing calculated and experimental thermograms. Its relevance to the real process is shown. The author shows the possibility of selecting the required electromagnetic heating process mode by means of numerical computer analysis. The mathematical model considered is recommended for practical application in building technology.

Key words: electromagnetic heating, building materials, mathematical modeling, heating dynamics

For citation:

Rudobashta S.P. Mathematical modeling of processes electromagnetic heating of building materials. *Smart Composite in Construction*. 2021. Vol. 2. No 3. P. 46-57 URL: http://comincon.ru/index.php/tor/V2N3_2021

DOI: 10.52957/27821919_2021_3_46



ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитный нагрев материалов токами различной частоты - в инфракрасном (ИК), высокочастотном (ТВЧ) и сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазонах в настоящее время достаточно широко применяется в различных технологиях [1, 2]. Его достоинством является выделение электромагнитной энергии внутри материала, что обеспечивает качественный и быстрый нагрев изделия. Глубина проникновения электромагнитной энергии Δ (м) при облучении изделия определяется выражением [3]

$$\Delta = 9,55 \cdot 10^7 / f \sqrt{\epsilon' \operatorname{tg} \delta}, \quad (1)$$

где f - частота электромагнитного поля, Гц;

ϵ' - относительная диэлектрическая проницаемость материала;

$\operatorname{tg} \delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь.

При ТВЧ-нагреве $f = 10\text{--}25$ МГц, при СВЧ-нагреве обычно используется разрешенная частота $f = 2450$ МГц. Анализ глубины проникновения электромагнитного поля в материал на основе уравнения (1) при частотах f , характерных для ТВЧ- и СВЧ-диапазонов, показывает, что она достаточно велика (масштаб сантиметров), а коэффициент затухания лучистого потока, поступающего в тело, соответственно мал. По этой причине при ТВЧ- и СВЧ-нагреве строительного изделия, в силу большой глубины проникновения в него электромагнитного поля, внутренний объемный источник теплоты q_v (Вт/м³) в теле можно принять постоянным: $q_v = \text{const}$. Длина волн в инфракрасном диапазоне составляет $\lambda = 0.8 \cdot 10^6\text{--}0.8 \cdot 10^3$ м, чему соответствует частота $f = c/\lambda = 3.75 \cdot 10^{11}\text{--}3.75 \cdot 10^{14}$ Гц. При этих частотах глубина проникновения электромагнитного поля не превышает нескольких мм, что и предопределяет область применения ИК-нагрева: это тонкостенные изделия.

При электромагнитном энергоподводе к влажным материалам, одновременно с их нагревом, происходит испарение влаги, сопровождающееся стоком теплоты на этот процесс, что необходимо учитывать в математической модели. Во многих случаях именно удаление влаги из материала (сушка) является целью электромагнитного энергоподвода. Для термолабильных материалов для сохранения их качества электромагнитный энергоподвод осуществляется, как правило, в осциллирующем (прерывистом) режиме [5, 7-15], который позволяет не перегревать материал. Электромагнитный энергоподвод часто комбинируют с конвективным [1, 2, 4, 5, 7]. Математические модели, описывающие тепломассоперенос при прерывистом конвективном, электромагнитном и комбинированном энергоподводе, приведены в [5-8, 10-15]. Они используют как численные [6-8, 11, 12, 15], так и аналитические [3, 10, 13, 14] методы решения задач. В [11, 13, 14] полученные решения были использованы для

компьютерного анализа влияния параметров осциллирующего электромагнитного нагрева на технологический процесс с целью поиска необходимого технологического режима.

Достоинством аналитических методов является прозрачность полученных решений для анализа и возможность не прогонять решение нестационарных задач через весь временной интервал, а сразу вычислять искомую функцию, что ускоряет вычисление. Но аналитические решения, как правило, удается получить только для линейных задач, характеризующихся постоянством теплофизических характеристик и других параметров процесса. Важным преимуществом численных методов является возможность выполнения расчетов для нелинейных задач - при переменных электро- и теплофизических характеристиках процесса. Отметим, что применение, так называемого, «зонального метода» [16], в соответствии с которым весь процесс разбивается на ряд зон, в которых параметры процесса принимаются постоянными, позволяет рассчитывать кинетику на основе аналитических решений линейных задач массо- и теплопроводности. Близким по физической сущности, но имеющим свои отличительные особенности, является «метод микропроцессов» [17]. Оба метода в настоящее время с успехом применяются для расчета тепломассопереноса в различных технологических процессах. Зональный метод кинетического расчета различных процессов использовался во многих работах, в частности, в работах последнего времени [18-22].

При приготовлении строительных смесей (бетонов и др.) в строительной индустрии в настоящее время используются различные способы улучшения их качества или качества самого технологического процесса (применение различных добавок, например в [23], тепловой обработки, электрических и электромагнитных воздействий [24]). В [24] отмечается, что тепловая обработка бетона, выполняемая тем или иным способом, стала неотъемлемой частью современного технологического процесса в строительной индустрии и, что наряду с традиционным методом тепловлажностной обработки бетонов водяным паром, в последние годы большое внимание уделяется применению различных методов электротермической обработки железобетонных изделий, а также электромагнитных воздействий. Согласно [25] в промышленности эксплуатируются высокопроизводительные установки для тепловой СВЧ-обработки бетонных изделий. Преимуществом этих установок является равномерный нагрев по всему объему бетонного изделия, в результате чего значительно ускоряется технологический процесс. При тепловой обработке обычно осуществляется нагрев исходных компонентов или готовой бетонной смеси (до или после формирования изделия) до температуры порядка 50-80°C - это предварительный разогрев, затем изделие выдерживается при этой температуре и твердеет в течение определённого времени



(изотермическая стадия), после этого оно постепенно охлаждается и проходит следующие стадии технологического процесса [24]. Из этого следует, что при нагреве температура строительного изделия не должна превышать определенной величины, а в течение всего процесса изменяться определенным образом.

Для правильного выбора теплового режима электромагнитного нагрева бетонного изделия (СВЧ, инфракрасного и т.д.) целесообразно иметь описывающую этот процесс математическую модель, с помощью которой можно осуществлять компьютерное моделирование процесса и находить необходимый технологический режим.

Цель данной работы – рассмотреть аналитическую математическую модель, описывающую осциллирующий электромагнитный нагрев строительного изделия (материала) в форме пластины и показать ее возможности при выборе необходимого технологического режима.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО НАГРЕВА ПЛА- СТИНЫ

При практическом применении осциллирующего электромагнитного нагрева прерывистость облучения материала может обеспечиваться за счет контроллера, отслеживающего температуру в той или иной точке материала и отключающего, и включающего источник излучения в нужные моменты времени. Но необходимый осциллирующий температурный режим можно задать изначально с помощью программы, описывающей этот процесс, и, используя компьютер, моделировать процесс, подбирая его необходимые параметры. В [10, 13, 14] были разработаны аналитические математические модели для тел разной формы: пластины [10], шара [13] и цилиндра [14], описывающие их осциллирующий электромагнитный нагрев. Рассмотрим модель для пластины, поскольку она наиболее типична для строительных изделий.

Задача в [10] сформулирована применительно к влажному телу и предполагает испарение из него влаги. При этом были приняты следующие условия и допущения: 1) тело имеет форму неограниченной пластины толщиной R и находится на поверхности, непроницаемой для потоков теплоты и влаги; 2) противоположная ее поверхность участвует в процессе теплообмена с газовой средой по законам тепло и массотдачи; 3) внутренние фазовые превращения (сток теплоты на испарение влаги имеет место у поверхности тела); 4) поглощение лучистой энергии происходит согласно закону Бугера–Ламберта–Бера; 5) коэффициент проницаемости тела равен нулю; 6) циклы “нагрев–остывание” тела одинаковы по длительности с одинаковыми значениями в них длительностей стадий нагрева $\tau_{\text{наг}}$ и остывания τ_0 ; 7) все теплофизические и электрофизические характеристики материала,

кинетические характеристики процесса, а также температура газовой среды и концентрация пара в ней постоянны. Задача электромагнитного нагрева тела предполагает его теплообмен с внешней газовой средой и сток теплоты на испарение влаги, который происходит у поверхности тела. Задача описывает также двухсторонний нагрев пластины, при этом начало координат размещено в центральной плоскости пластины.

С учетом приведенных выше условий задача нагрева пластины в осциллирующем электромагнитном поле имеет следующий вид:

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

$$t(x, \tau)|_{\tau=0} = f_2(x), \quad 0 \leq x \leq R; \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \tau > 0; \quad (4)$$

$$\left. \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=R} = \alpha (t_c - t(R)) - r^* \cdot i(\tau), \quad \tau > 0; \quad (5)$$

$$f_1(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \eta(\tau - n\tau_0) - \eta[\tau - (n\tau_0 + \tau_{\text{наг}})], \quad (6)$$

где $a, c, \rho_0, \mu^*, q_0, A, \lambda, \alpha, R, t_c, r^* = \text{const}$;
 t – локальная температура в пластине, °С;
 τ – время,
 $c; a, \lambda, c\rho$ – коэффициенты температуропроводности (м²/с) и теплопроводности (Вт/(м·К)), объемная теплоемкость пластины (Дж/(м³·К)), соответственно;
 μ^* – коэффициент ослабления, м⁻¹;
 R^* – коэффициент отражения, безразмерный;
 r^* – теплота парообразования, Дж/кг;
 q_0 – плотность потока лучистой энергии, падающей на пластину, Вт/м²;
 α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); t_c – температура внешней среды, °С

$f_1(\tau)$ – единичная периодическая функция, описывающая цикличность облучения;

$i(\tau)$ – интенсивность сушки, кг/(м²·с);

η – единичная функция Хевисайда, с использованием которой функция $f_1(\tau)$ может быть записана как $f_1(\tau) = \eta(\tau) - \eta(\tau - \tau_{\text{наг}})$ (при $n = 0$ – один цикл облучения).

Периодическая функция $f_1(\tau)$ иллюстрируется рис. 1.

Второе слагаемое уравнения (2) выражает действующий внутри пластины источник теплоты, вызванный поглощением лучистой энергии, уравнение (3) описывает начальное условие, которое в целях общности постановки задачи принято неравномерным, уравнение (4) выражает отсутствие теплового потока в пластине при координате $x = 0$, уравнение (5) – граничное условие теплообмена 3-го рода, которое описывает теплообмен по закону теплоотдачи Ньютона с учетом стока теплоты на испарение влаги у поверхности тела. При $i(\tau) = 0$



испарение отсутствует, и задача описывает «чистый» теплообмен пластины с электромагнитным подводом энергии и конвективным ее теплообменом с внешней средой. При этом при $t > t_c$ часть подведенной электромагнитной энергии теряется в окружающую среду, а при $t < t_c$ имеет место комбинированный конвективно-электромагнитный нагрев пластины.

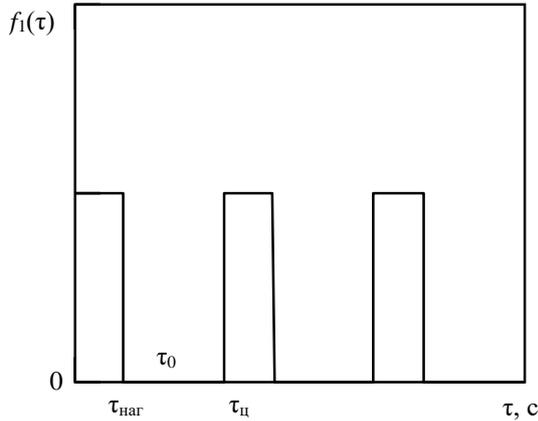


Рис. 1. Периодическая функция $f_1(\tau)$ в уравнении (2): $\tau_{ц}$ – время цикла; τ_0 – время нагрева в цикле; τ_0 – время остывания в цикле

Fig. 1. The periodic function $f_1(\tau)$ in equation (2): τ_c – cycle time; τ_0 – heating time in the cycle; τ_0 – cooling time in the cycle

Приведем решение для случая $t(x, \tau)|_{\tau=0} = t_n$, оно равно сумме слагаемых [10]:

$$W(\xi, Fo) = W_1(\xi, Fo) + W_2(\xi, Fo) + W_3(\xi, Fo) \quad (7)$$

где:

$$W_1(\xi, Fo) = 2N_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + Bi^2) A_n(0) \cos \mu_n \xi}{\mu_n^2 + Bi^2 + Bi} e^{-\mu_n^2 Fo} \quad (8)$$

$$W_2(\xi, Fo) = 2\theta_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + Bi^2) A_n(\mu_0^*) \Psi_n(Fo) \cos \mu_n \xi}{\mu_n^2 + Bi^2 + Bi} \quad (9)$$

$$W_3(\xi, Fo) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu_n^2 + Bi^2) A_n(0) D_n(Fo) \cos \mu_n \xi}{\mu_n^2 + Bi^2 + Bi} e^{-\mu_n^2 Fo} \quad (10)$$

здесь $\mu_n > 0$ – корни уравнения,

$$ctg \mu = \frac{\mu}{Bi} \quad (11)$$

$Bi = \alpha R / \lambda$ – число Био теплового;

$\xi = x/R$; $Fo = \alpha \tau / R^2$ – число Фурье теплового;

t_n – начальная температура материала, °C;

$$N_0 = \frac{t_n - t^*_{c}}{t_n - t_c};$$

$$\theta_0 = \frac{\mu^* q_0 A R^2}{\lambda(t_n - t_c)}; W(\xi, Fo) = \frac{t_1(x, \tau) - t_c}{t_n - t_c};$$

$$\varphi(\tau) = \frac{r \cdot i(\tau)}{\alpha}; t_1(x, \tau) = t(x, \tau) + \varphi(\tau).$$

Средняя по объему температура пластины равна

$$\bar{W}(Fo) = \int_0^1 W(\xi, Fo) d\xi. \quad (12)$$

При небольших интервалах $\tau_{наг}$ и τ_0 в циклах $\tau_{ц}$ «нагрев-остывание» осцилляции температуры не искажают кривую кинетики сушки и она имеет гладкий монотонный характер, что подтверждается экспериментально [26]. Это позволяет использовать для расчета интенсивности сушки $i(\tau)$, входящей в параметр $\varphi(\tau)$, аналитическое решение задачи массопроводности, которое для пластины применительно к среднеобъемному влагосодержанию в теле \bar{u} при $k, \beta_c, u_n, C_c = const$ имеет вид [27]

$$\bar{E} = \frac{\bar{u} - u_p}{u_n - u_p} = \sum_{k=1}^{\infty} B_k \exp(-\beta_k^2 Fo_m), \quad (13)$$

где u_n и u_p – начальное и равновесное влагосодержание пластины соответственно, кг/(кг сух. м-ла);

β_k – корни характеристического уравнения ($\beta_k > 0$);

$$ctg \beta = \frac{\beta}{Bi_m}, \quad (14)$$

$$B_k = \frac{2Bi_m^2}{\beta_k^2 (Bi_m^2 + \beta_k^2 + Bi_m)}, \quad (15)$$

$Bi_m = \frac{\beta_c R}{k \rho_0 A_p}$ число Био массообменное;

k – коэффициент массопроводности, м²/с;

β_c – коэффициент массоотдачи, м/с;

ρ_0 – плотность абсолютно сухого материала, кг/м³.

На основе (13) найдём интенсивность сушки $i(\tau)$

$$i(\tau) = -\frac{d\bar{u}}{d\tau} R \rho_0 = \left[\frac{\rho_0 k}{R} \sum_{k=1}^{\infty} B_k \beta_k^2 \exp(-\beta_k^2 Fo_m) \right] (\bar{u}_n - u_p). \quad (16)$$

Коэффициент массопроводности k в процессе сушки изменяется, являясь функцией температуры и влагосодержания материала: $k = f(u, t)$, но применение зонального метода расчёта [27] позволяет учесть это изменение.

Проанализируем приведенное решение задачи осциллирующего нагрева пластины путём расчёта изменения ее температуры. Пусть $R = 0,9 \cdot 10^{-3}$ м. В расчётах примем: 1) открытая поверхность пластины, обращённая к источнику излучения, обдувается потоком воздуха с температурой $t_c = 20$ °C и влагосодержанием $d = 0,01$ кг/(кг сушильного агента), со скоростью $v = 1,5$ м/с; 2) начальная температура пластины: $t_n = 18$ °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. Поскольку число Re для этих условий составило $Re = 1,15 \cdot 10^4$, то были использованы следующие формулы [28]:

$$Nu = 0,51 Re^{0.61} Pr^{0.33} Gu^{0.175} \quad (17)$$

$$Sh = 0,49 Re^{0.61} Sc^{0.33} Gu^{0.135} \quad (18)$$

где $Re = vl/\nu_c$ – число Рейнольдса;
 $Pr = \nu_c/a_c$ – число Прандтля;
 $Gu = \frac{T_c - T_{m,m}}{T_c}$ – число Гухмана;
 $Sh = \beta_c l/D$ – число Шервуда;
 v – скорость воздуха, м/с;
 ν_c, a_c – кинематическая вязкость и температуропроводность воздуха, соответственно, m^2/c ;
 β_c – коэффициент массоотдачи, м/с;
 D – коэффициент диффузии пара в воздухе (коэффициент взаимодиффузии), m^2/c ;
 $T_c, T_{m,m}$ – температура среды (воздуха) и мокрого термометра, соответственно, К.

В результате было получено: $\alpha = 13,8 \text{ Вт}/(m^2 \cdot K)$; $\beta_c = 0,015$ м/с. Расчеты выполняли при этих значениях коэффициентов тепло- и массоотдачи, считая их неизменными в процессе сушки - для материала, имеющего следующие характеристики:

$$\rho = 680 \text{ кг}/m^3; \rho_0 = 470 \text{ кг}/m^3; a = 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/c;$$

$$\lambda = 0,33 \frac{\text{Вт}}{\text{МК}}; k = 4,5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/c;$$

$$R^* = 0,1; u_n = 0,51 \text{ кг}/(\text{кг сух. м} - \text{ла});$$

$$u_p = 0,037 \text{ кг}/(\text{кг сух. м} - \text{ла}); \mu^* = 1000 \text{ 1}/\text{м}.$$

Расчеты выполняли для условий, которые были в эксперименте [9] с тем, чтобы иметь возможность проверить адекватность математической модели. Поэтому было далее принято: $q_0 = 2000 \text{ Вт}/m^2$; $r^* = 2437 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}$ (это значение r^* равно теплоте парообразования (без учёта теплоты адсорбции) при средней предварительно принятой в расчёте температуре пластины 37°C ; $\tau_{наг} = 15$ с; $\tau_c = 60$ с.

Температура пластины в цикле изменяется от минимального значения t_{min} до максимального t_{max} ; $\tau_{наг} = 15$ с; $\tau_c = 60$ с. С использованием приведенных выше данных был рассчитан коэффициент $A_{p,n}$ и далее число Bi_m . Они оказались равными: $A_{p,n} = u_{p,n}/C_{с,п} = 3,42 \text{ (кг}/(\text{кг сух. м} - \text{ла}))/(\text{кг}/m^3)$; $Bi_m = (\beta_c R)/(k\rho_0 A_{p,n}) = 187$. Полученное значение числа Bi_m свидетельствует о том, что в рассматриваемом процессе реализуется чисто внутридиффузионный кинетический режим сушки и, следовательно, параметры β_k и B_k в уравнениях (14) и (15) определяются выражениями [27]: $\beta_k = (2k - 1)\pi/2$; $B_k = 2/\beta_k^2$, которые и были использованы в расчёте.

Расчеты процесса электромагнитного нагрева пластины выполнялись при разных значениях величин τ_c и

$\tau_{наг}$. На рис. 2 показано распределение температуры по толщине пластины в одном из вариантов расчета. Как видно из рисунка, в данном случае оно незначительно. Это объясняется тем, что число Био при принятых в расчёте параметрах мало ($Bi = \alpha R/\lambda = 0,038$).

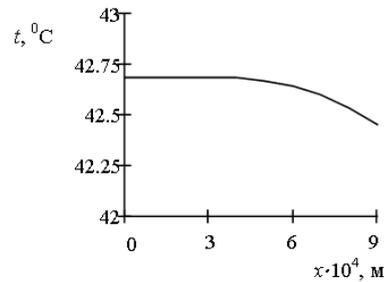


Рис. 2. Расчётное распределение температуры по толщине пластины в конце стадии нагрева в одном цикле ($t_c = 20^\circ\text{C}$; $t_n = 18^\circ\text{C}$)

Fig. 2. Calculated temperature distribution over the plate thickness at the end of the heating stage in one cycle ($t_c = 20^\circ\text{C}$; $t_n = 18^\circ\text{C}$)

Были получены далее расчётные температурные кривые $t_{x=R} = f(\tau)$, которые были сопоставлены с результатами экспериментальных измерений работы [9]. На рис. 3 показано расчетное изменение во времени температуры поверхности пластины. Как видно из рисунка, температура на поверхности пластины колеблется в циклах от в пределах от $t_{min} = 34^\circ\text{C}$ до $t_{max} = 40^\circ\text{C}$, продолжительность цикла составляет $\tau_c = 60$ с, а продолжительность стадии нагрева в нем $\tau_{наг} = 15$ с.

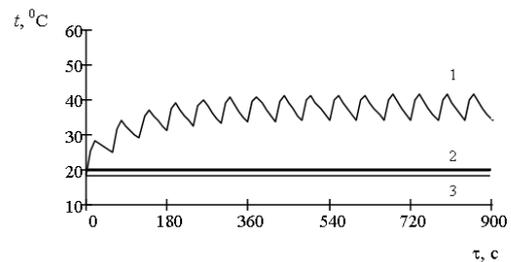


Рис. 3. Расчётное изменение температуры поверхности пластины во времени при осциллирующей инфракрасной сушке:

$$1 - t_{x=R} = f(\tau); 2 - t_c = 20^\circ\text{C}; 3 - t_n = 18^\circ\text{C}$$

Fig. 3. Calculated change of the plate surface temperature over time during oscillating infrared drying:

$$1 - t_{x=R} = f(\tau); 2 - t_c = 20^\circ\text{C}; 3 - t_n = 18^\circ\text{C}$$

На рис. 4 показано изменение температуры поверхности тела в форме пластины (влажного монослоя плоских тел – семян - толщиной) $R = 0,9 \cdot 10^{-3}$ м, которые имели



те же теплофизические параметры, что и в расчете. Сушка монослоя осуществлялась инфракрасным способом в осциллирующем режиме при одновременном

продольном обдуве поверхности слоя холодным потоком воздуха с температурой 20 °С со скоростью 1,8 м/с.

С помощью регулятора температура поверхности слоя поддерживалась в интервале 34-40 °С.

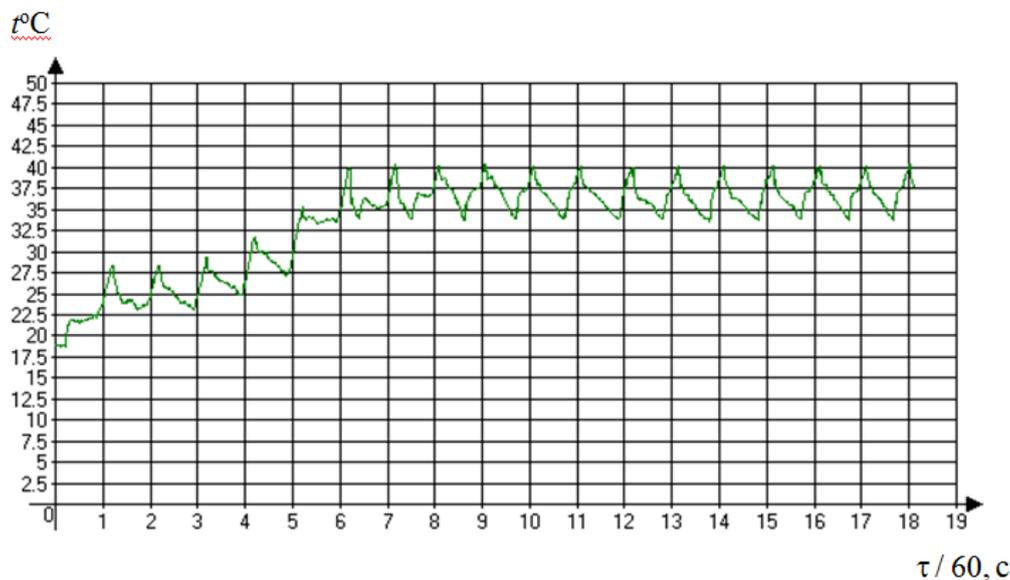


Рис. 4. Экспериментальное изменение температуры поверхности монослоя влажных плоских тел толщиной

$R = 0,9 \cdot 10^{-3}$ м во времени при их осциллирующем ИК-облучении

($v=1,8$ м/с; $u_n = 0,51$ кг/(кг сух. м-ла); $t_{max} = 40$ °С; $t_{min} = 34$ °С [9])

Fig. 4. Experimental change in the surface temperature of a monolayer of wet flat bodies with a thickness $R = 0,9 \cdot 10^{-3}$ м in time under their oscillating IR-irradiation

($v=1.8$ m/s; $i_n = 0.51$ kg/(kg dry. m-la); $t_{max} = 40$ °С; $t_{min} = 34$ °С [9])

Как показывает сопоставление рис. 3 и рис. 4, результаты расчета согласуются с опытными данными, а именно: термограммы нагрева поверхности слоя в обоих случаях близки. Существенно отметить, что в эксперименте значения $t_{max} = 40$ °С; $t_{min} = 34$ °С поддерживались с помощью регулятора системы автоматического управления процессом, а при математическом моделировании они подобраны путем задания соответствующих значений параметров $\tau_{ц}$ и $\tau_{наг}$ при прочих равных параметрах процесса, причем значение $\tau_{ц}$ в обоих случаях одинаково и равно 60 с. Продолжительность стадии нагрева в опытах со временем несколько увеличивается, что объясняется изменением теплофизических характеристик семян вследствие их сушки.

Проведенное сравнение показывает, что аналитические зависимости по динамике нагрева влажной пластины и ее сушке адекватны реальному процессу и могут быть использованы для расчёта и численного анализа процесса ее осциллирующего электромагнитного нагрева. Изменяя параметры осциллирующего нагрева,

такие как плотность лучистого потока q_0 , продолжительность цикла $\tau_{ц}$ и стадии нагрева $\tau_{наг}$ в нем, температуру наружного воздуха t_c и скорость v обдува поверхности пластины, можно регулировать динамику нагрева и численным методом находить желаемый температурный режим. Так, при увеличении q_0 и $\tau_{наг}$ значения t_{max} и t_{min} будут расти и будет увеличиваться темп нагрева – до тех пор, пока подведенное с помощью электромагнитного поля тепло не будет полностью отводиться за счет конвективного охлаждения. При высокой температуре внешней среды ($t_c > t$) будет осуществляться комбинированный «конвективно-электромагнитный» нагрев изделия, а математическая модель будет показывать динамику нагрева. Таким образом, приведенное аналитическое решение задачи динамики нагрева пластины в условиях осциллирующей электромагнитного энергоподвода в совокупности с решением задачи массопроводности и зависимости, следующие из них, позволяют рассчитывать температурное поле в пластине, изменение ее среднеобъемной температуры во времени, что несёт в



себе информацию, существенную для организации процесса термообработки влажного строительного материала.

ВЫВОДЫ

1) Проведенное исследование осциллирующего электромагнитного нагрева влажной пластины на основе аналитического решения задачи показало ее адекватность реальному процессу и, следовательно, применимость для анализа температурного режима процесса нагрева строительных материалов с целью нахождения необходимого технологического варианта.

2) Варьируя такие параметры процесса, как плотность лучистого потока, продолжительность цикла облучения и стадии нагрева в нем, интенсивность конвективного теплообмена, можно находить необходимые значения максимальной и минимальной температуры в циклах нагрева, темп нагрева и максимальную температуру в конце стадии нагрева изделия.

ЛИТЕРАТУРА

- Ratti C., Mujumdar A. S.** Handbook of Industrial Drying. 3rd ed. A.S. Mujumdar (Ed). Boca Raton, FL.: CRC Press. 2007.
- Kudra T., Strumillo Cz.** Thermal Processing of Bio-materials. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers. 1998.
- Рудобашта С.П., Карташов Э.М., Зуева Г.А.** Тепломассоперенос при сушке пластины в непрерывно действующем электромагнитном поле высокой и сверхвысокой частоты. *Теор. основы хим. технологии.* 2021. Т. 55. № 2. С. 195-203.
- Акулич П.В., Драгун В.Л., Куц П.С.** Технологии и техника сушки и термообработки материалов. Минск: Белорусская наука. 2006.
- 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. *Drying technology.* 2016. V. 34. N 8. P. 962-973.
- Bon J., Kudra T.** Enthalpy-Driven Optimization of Intermittent Drying. *Drying Technology.* 2007. V. 25. N 4. P. 523-532.
- Акулич П.В., Темрук А.В., Акулич А.В.** Моделирование и экспериментальное исследование тепло- и влагопереноса при СВЧ-конвективной сушке растительных материалов. *Инж.-физ. журнал.* 2012. Т. 85. № 5. С. 951-958.
- Vaquiro H. A., Clemente G., Garcia-Perez J. V., Mulet A., Bonb J.** Enthalpy-driven optimization of intermittent drying of *Mangifera indica*. *Chemical engineering research and design.* 2009. V. 87. P. 885-898.
- Рудобашта С.П., Григорьев И.В.** Импульсная инфракрасная сушка семян. *Промышленная теплотехника.* 2011. Т. 33. № 8. С. 85-90.
- Рудобашта С. П., Карташов Э. М., Зуев Н. А.** Тепломассоперенос при сушке в осциллирующем электромагнитном поле. *Теорет. основы хим. технологии.* 2011. Т. 45. № 6. С. 641-647.
- Esturk O.** Intermittent and continuous microwave-convective air-drying characteristics of sage (*Salvia officinalis*) leaves. *Food and Bioprocess Technology.* 2012. V. 5. N 5. P. 1664-1673.
- Гринчик Н.Н., Акулич П.В., Адамович А.Л., Куц П.С., Кундас С.П.** Моделирование неизотермического тепло- и влагопереноса в капиллярнопористых средах при периодическом микроволновом нагреве. *Инж.-физ. журнал.* 2007. Т. 80. № 1. С. 3-12.
- Rudobashta S. P., Zueva G. A.** Heat and mass transfer when drying a spherical particle in an oscillating electromagnetic field. *Theor. Found. of Chem. Eng.* 2016. V. 50. N 5. P. 718-729.
- Rudobashta S. P., Zueva G. A., Kartashov E. M.** Heat and mass transfer in the drying of a cylindrical body in an oscillating electromagnetic field. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics.* 2018. V. 91. N 1. January. P. 227-236.
- 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 and Bioprocess Technology.* 2014. V. 7. N 8. P. 2308-2318.
- Рудобашта С.П., Плановский А.Н., Очнев Э.Н.** Зональный метод расчета непрерывнодействующих массообменных аппаратов для систем с твердой фазой. *Теор. основы хим. технологии.* 1974. Т. 8. № 1. С. 22-29.
- Федосов С.В.** Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ИПК «ПресСто». 2010. 164 с.
- Рудобашта С.П.** Кинетический расчет массообменных процессов для систем с твердой фазой (сушка и экстрагирование). *Доклады ТСХА.* 2020. С. 186-190.
- Rudobashta S.P., Muravleva E.A., Zueva G.A.** Farm grain dryer with a heat pump and its calculation. *Journal of General Chemistry.* 2020. V. 90. N 6. P. 1163-1167.
- Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зуев Н.А.** Сушка-стимуляция семян методом осциллирующего инфракрасного облучения. *Передовые достижения в применении автоматизации, роботизации и электротехнологий в АПК: Сборник статей научно-практической конференции, посвященной памяти академика РАСХН, д.т.н., профессора И.Ф. Бородина (90 лет со дня рождения).* Иваново: Общество с ограниченной ответственностью Мегapolis. 2019. С. 156-164.
- Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zaytsev V.A.** Modeling of the deep drying process of granulated polyamide at



- convective-infrared energy sub-supply. *Chem. Technol.* 2019. V. 62. N 12. P. 94-100.
22. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А.** Математическое моделирование процесса сушки материала в аппарате с псевдооживленным слоем. *Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-19*. Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. 2019. Т. 8. С. 77-80.
 23. **Бориславский В.Т., Горина С.С., Ольшанский Д.Я., Очнев Э.Н., Рудобашта С.П.** Строительный раствор. А.С. № 423765 А1 СССР. Опубл. 15.04.1974.
 24. **Федосов С. В., Бобылев В.И., Соколов А.М.** Электро-тепловая обработка бетона токами повышенной частоты на предприятиях сборного железобетона. Иваново: ИВГПУ. 2016. 336 с.
 25. **Трембицкий С.М.** Энергосберегающие технологии изготовления железобетонных изделий и конструкций. *Бетон и железобетон*. 2006. № 6. С. 23-26.
 26. **Rudobashta S., Zueva G.** Drying of seeds through oscillating infrared heating. *Drying Technology*. 2016. V. 34. N 5. P. 505-515.
 27. **Рудобашта С.П.** Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия. 1980. 248 с.
 28. **Лыков А.В.** Теория сушки. М.: Энергия. 1968. 422 с.
 8. **Vaquiرو H. A., Clemente G., Garcia-Perez J. V., Mulet A., Bonb J.** Enthalpy-driven optimization of intermittent drying of *Mangifera indica*. *Chemical engineering research and design*. 2009. V. 87. P. 885-898.
 9. **Rudobashta S.P., Grigoriev I.V.** Impulse infrared drying of seeds. *Promyshlennaya teplotekhnika*. 2011. V. 33. N 8. P. 85-90 (in Russian).
 10. **Rudobashta S.P., Kartashov E. M., Zuev A.N.** Heat and mass transfer during drying in an oscillating electromagnetic field. *Teoret. osnovy khim. tekhnologii*. 2011. V. 45. N 6. P. 641-647 (in Russian).
 11. **Esturk O.** Intermittent and continuous microwave-convective air-drying characteristics of sage (*Salvia officinalis*) leaves. *Food and Bioprocess Technology*. 2012. V. 5. N 5. P. 1664-1673.
 12. **Grinchik N.N., Akulich P.V., Adamovich A.L. Kuts P.S., Kundas S.P.** Modeling of non-isothermal heat and moisture transfer in capillary-porous media with periodic microwave heating. *Inzh.-fiz. zhurnal*. 2007. V. 80. № 1. P. 3-12 (in Russian).
 13. **Rudobashta S. P., Zueva G. A.** Heat and mass transfer when drying a spherical particle in an oscillating electromagnetic field. *Theor. Found. of Chem. Eng.* 2016. V. 50. N 5. P. 718-729.
 14. **Rudobashta S. P., Zueva G. A., Kartashov E. M.** Heat and mass transfer in the drying of a cylindrical body in an oscillating electromagnetic field. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2018. V. 91. N 1. January. P. 227-236.
 15. **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 and Bioprocess Technology*. 2014. V. 7. N 8. P. 2308–2318.
 16. **Rudobashta S. P., Planovsky A.N. Ochnev E.N.** Zonal method for calculating continuous mass transfer apparatus for systems with a solid phase. *Teor. osnovy khim. tekhnologii*. 1974. V. 8. N 1. P. 22-29 (in Russian).
 17. **Fedosov S.V.** Heat and mass transfer in technological processes of the construction industry. Ivanovo: IPK «PresSto». 2010. 164 p. (in Russian).
 18. **Rudobashta S.P.** Kinetic calculation of mass transfer processes for systems with a solid phase (drying and extraction). *Doklady TSKhA*. 2020. P. 186-190 (in Russian).
 19. **Rudobashta S.P., Muravleva E.A, Zueva G.A.** Farm grain dryer with a heat pump and its calculation. *Journal of General Chemistry*. 2020. V. 90. N 6. P. 1163-1167.
 20. **Rudobashta S.P., Zueva G. A., Zuev A.N.** Drying-stimulation of seeds by the method of oscillating infrared irradiation. *Peredovyye dostizheniya v primenenii avtomatizatsii. robotizatsii i elektrotekhnologiy v APK. Sbornik statey nauchno-prakticheskoy konferentsii. posvyashchennoy pamyati akademika RASKhN. d.t.n.. professora I.F. Borodina (90 let so dnya rozhdeniya)*. Ivanovo: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennostyu Megapolis. 2019. P. 156-164 (in Russian).

Поступила в редакцию 06.09.2021

Принята к опубликованию 21.09.2021

REFERENCES

1. **Ratti C., Mujumdar A. S.** Handbook of Industrial Drying. 3rd edition. A.S. Mujumdar (Ed). Boca Raton. FL.: CRC Press. 2007.
2. **Kudra T., Strumillo Cz.** Thermal Processing of Bio-materials. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers. 1998.
3. **Rudobashta S.P., Kartashov E. M., Zueva G.A.** Heat and mass transfer during plate drying in continuous operating electromagnetic field of high and ultra-high frequency. *Teor. osnovy khim. tekhnologii*. 2021. V. 55. N 2. P. 195-203 (in Russian).
4. **Akulich P.V., Dragun V.L., Kuts P.S.** Technologies and techniques for drying and heat treatment of materials. Minsk: Belorusskaya nauka. 2006 (in Russian).
5. **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. *Drying technology*. 2016. V. 34. N 8. P. 962-973.
6. **Bon J., Kudra T.** Enthalpy-Driven Optimization of Intermittent Drying. *Drying Technology*. 2007. V. 25. N 4. P. 523-532.
7. **Akulich P.V., Temruk A.V. Akulich A.V.** Modeling and experimental study of heat and moisture transfer during microwave convective drying of plant materials. *Inzh.-fiz. zhurnal*. 2012. V. 85. N 5. P. 951-958 (in Russian).



21. **Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zaytsev V.A.** Modeling of the deep drying process of granulated polyamide at convective-infrared energy sub-supply. *Chem. Technol.* 2019. V. 62. N 12. P. 94-100.
22. **Rudobashta S.P., Zueva G.A.** Mathematical modeling of the material drying process in a fluidized bed apparatus. *Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT-19.* Saratov: Saratovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet imeni Gagarina Yu.A. 2019. V. 8. P. 77-80 (in Russian).
23. **Borislavsky V.T., Gorina S.S., Olshansky D.Ya., Ochnev E.N., Rudobashta S.P.** Mortar. USSR I.C. N 423765 A1. Publ. 15.04.1974.
24. **Fedosov S.V., Bobylev V.I., Sokolov A.M.** Electric heat treatment of concrete with high-frequency currents at precast concrete enterprises. Ivanovo: IVGPU. 2016. 336 c. (in Russian).
25. **Trembitsky S.M.** Energy-saving technologies for the manufacture of reinforced concrete products and structures. *Beton i zhelezobeton.* 2006. N 6. P. 23-26 (in Russian).
26. **Rudobashta S., Zueva G.** Drying of seeds through oscillating infrared heating. *Drying Technology.* 2016. V. 34. N 5. P. 505-515.
27. **Rudobashta S.P.** Mass transfer in solid phase systems. Moscow: Khimiya. 1980. 248 p. (in Russian).
28. **Lykov A.V.** Drying theory. Moscow: Energiya. 1968. 422 p. (in Russian).

Received 06.09.2021

Accepted 21.09.2021