

УДК 637.523.27; 536.25

Аналитическое исследование процесса тепломассопереноса при инфракрасном нагреве морской капусты

Д-р техн. наук Вороненко Б.А. voronenkoboris@mail.ru

канд. техн. наук Демидов С.Ф. demidovserg@mail.ru

Ободов Д.А.

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО

Институт холода и биотехнологий

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Проведено упрощение и компьютерное исследование аналитического решения задачи совместного тепло - и массопереноса при инфракрасном нагреве морской капусты.

Ключевые слова: тепломассоперенос, аналитическое исследование, числа (критерии) подобия.

Mathematical description of heat and mass transfer of seaweed by infrared heating

D.Sc. Voronenko B.A., *Ph.d.* Demidov S.F., Obodov D.A.

Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics.

Institute of Refrigeration and Biotechnology

191002, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

Performed a simplified calculation and analysis of the decision process, heat and mass transfer material at infrared heating seaweed.

Keywords: heat and mass transfer, mathematical description, number (criteria) similarity.

В работе [1] поставлена и решена аналитически краевая задача совместного тепло- и массопереноса в слое морской капусты при её термической обработке энергией электромагнитного поля инфракрасного диапазона. Такой вид нагрева является промежуточным между поверхностным и объёмным (энергией СВЧ-поля) [2].

В работе [2] исследования внутренних процессов при ИК-нагреве проводились на образцах толщиной до 5 мм: при указанной толщине вся энергия поля полностью поглощается продуктом. Мощность внутреннего источника тепла принималась убывающей в зависимости от расстояния от поверхности образца — полубесконечной

пластины ($0 \leq x < \infty$) - по экспоненциальному закону:

$$Q_v / c_q \gamma_0 = A e^{-kx} \quad (1)$$

где Q_v — мощность внутренних источников тепла; c_q — удельная теплоёмкость материала образца; γ_0 - плотность абсолютно сухого вещества; A — мощность ИК-источника; k — коэффициент поглощения ИК-энергии образцом.

Авторами [2] был проведен упрощённый расчёт процесса переноса тепла и массы вещества, используя систему дифференциальных уравнений взаимосвязанного тепломассопереноса [3] при равномерных начальных условиях и однородных граничных условиях - равных нулю на границе образца ($x = 0$) потенциалов переноса и их производных.

В работе [1] затухание лучистого потока, проникающего в капиллярно-пористый продукт — слой морской капусты в виде неограниченной пластины - описано параболическим законом изменения удельной энергии (мощности электромагнитного поля) от координаты [1, 4, 5]:

$$w(x) = w_0 \frac{x^2 - \lambda_{np}^2}{R^2 - \lambda_{np}^2} \quad (0 < \lambda_{np} \leq x \leq R), \quad (2)$$

где λ_{np} - предельная глубина проникновения инфракрасного излучения в материал, м; R — характерный размер: половина толщины пластины; $w(x)$ - удельная мощность источника тепла, Вт/м³; w_0 - начальная мощность (на поверхности тела).

Смешанными граничными условиями в рассматриваемой задаче [1] задаются потоки теплоты и влаги через поверхность тела.

Аналитическое решение краевой задачи в [1] получено методом интегрального преобразования Лапласа, и распределение полей влагосодержания и температуры в материале имеет следующий безразмерный вид:

$$\Theta(X, Fo) = Ki_m \left[Fo - \frac{1}{6}(1 - 3X^2) - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2}{\mu_n^2} \cos(\mu_n X) \exp(-\mu_n^2 Lu Fo) \right]; \quad (3)$$

$$T(X, Fo) = \Phi(X, Fo) + \frac{2\varepsilon K_0 Ki_m}{\pi^2 (1 - Lu)} \cos(\pi X) \exp(-\pi^2 Fo) \times$$

$$\times \left[1 - \exp\left(\pi^2 Fo(1 - Lu)\right) \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{n+1}}{\mu_n^2} \times$$

$$\times \left[Ki_q - KoKi_m (\varepsilon + (1 - \varepsilon)Lu) + \frac{2Po}{(1 - R_{np}^2)\mu_n^2} \right] \cos(\mu_n X) \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (4)$$

Анализ полученных решений (3) и (4) показывает, что благодаря быстрому увеличению абсолютной величины последовательного ряда характеристических корней $\mu_n = \pi$, а, следовательно, быстрого уменьшения

$$\Phi(X, Fo) = Fo \left(\frac{Po(1 - 3R_{np}^2(1 - R_{np}^2) - 3X^2)}{3(1 - R_{np}^2)} - \varepsilon KoLu + Ki_q \right) +$$

$$+ X^2 \left(\frac{1}{2} Ki_q + \frac{Po}{1 - R_{np}^2} - \frac{1 - \varepsilon}{2} KoLuKi_m \right) - \frac{1}{12} \frac{Po}{1 - R_{np}^2} X^4 -$$

$$- (1 - \varepsilon) KoLuKi_m + \frac{\varepsilon}{6} KoKi_m - \frac{Po}{180(1 - R_{np}^2)} (7 + 15X^4). \quad (5)$$

уменьшения экспоненциальных множителей $\exp(-\mu_n^2 Fo)$ и $\exp(-\mu_n^2 LuFo)$, бесконечные суммы, входящие в решения, сходятся достаточно быстро. Поэтому, начиная с определённого значения числа Фурье (или произведения чисел Lu и Fo), с заранее заданной степенью точности из всего разложения можно удовлетвориться одним - двумя первыми членами. Такое упрощение имеет большое практическое значение из-за существенного сокращения объёма расчётной работы и возможности представления общих решений в удобной для практического применения форме.

Так, формулой, удобной для инженерных расчётов полей потенциала влагопереноса, будет следующее выражение, полученное из (3) при $n = 1$:

$$\theta(X, Fo) = Ki_m \left[Fo - \frac{1}{6} (1 - 3X^2) \right] + \frac{2}{\pi^2} \cos(\pi X) \exp(-\pi^2 LuFo) \quad (6)$$

Среднее значение безразмерной величины потенциала переноса влаги для упрощенного выражения $f(X, Fo)$ при $n=1$ определяется формулой:

$$\bar{\theta}(Fo) = \int_0^1 \theta(X, Fo) dX = \frac{u_0 - \bar{u}(\tau)}{u_0} = K_{i_m} Fo, \quad (7)$$

откуда следует формула расчета времени, необходимого для достижения нагревания телом определенного влагосодержания:

$$\tau = \frac{a_m \gamma_0 R(u_0 - \bar{u}(\tau))}{a_q q_m} \quad (8)$$

Решение системы уравнений тепло- и массопереноса дает зависимость процесса инфракрасного нагрева морской капусты от большой группы теплообменных и массообменных чисел (критериев) подобия. Выражения для безразмерных влагосодержания и температуры в обобщенном критериальном виде можно записать так:

$$\theta = \theta(X, Fo, K_{i_m}, Lu, R_{пр}, \varepsilon); \quad T = T(X, Fo, \varepsilon, K_o, K_{i_q}, K_{i_m}, Lu, P_o, R_{пр}) \quad (9)$$

Однако, не все критерии в одинаковой мере влияют на ход процесса. Одни из них воздействуют на теплообменные характеристики переноса, другие – на массообменные [3]. Проведено количественное исследование решения (3) и (4).

Из аналитических исследований нестационарных полей потенциалов следует, что при постоянной интенсивности массообмена ($K_{i_m} = \text{const}$) необходимо различать две стадии развития процесса. Первая стадия характеризуется прогревом материала и частичным неустойчивым распределением потенциала массопереноса. В конце первой стадии ($Fo=0,5-0,7$) распределение потенциала массопереноса становится параболическим. Вторая стадия процесса характеризуется дальнейшим развитием полей потенциалов. Эта стадия протекает в упорядоченном или квазистационарном режиме, поэтому для расчета здесь можно использовать упрощенное решение (6).

Наиболее существенное влияние на тепло- и массоперенос оказывает число Lu . При малых значениях Lu потенциал массопереноса распространяется значительно быстрее, чем потенциал переноса тепла (температура).

Распределения потенциалов переноса в зависимости от параметра $R_{пр} = \frac{\lambda_{пр}}{R}$, характеризующего глубину проникновения инфракрасного излучения в материале, показывает, что данный параметр влияет, в основном, на повышение температуры материала в поверхностных слоях. Аналогично влияние числа Померанцева.

На основе проведенного анализа нестационарных полей потенциалов становится возможным пренебречь частью чисел подобия и тем самым упростить аналитическую модель молекулярного тепло- и массопереноса:

$$\theta = \theta(X, Fo, K_{i_m}, Lu); \quad T = T(X, Fo, Lu, P_o, R_{пр}) \quad (10)$$

Выводы

Проведено компьютерное исследование аналитического решения задачи совместного тепло- и массопереноса при инфракрасном нагреве морской капусты.

Список литературы:

1. Вороненко Б. А. Аналитическое исследование процесса сушки пшеничных зародышей инфракрасным облучением / Б. А. Вороненко, С. Ф. Демидов, Д.А. Ободов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств», 2013. - №2. [Электронный ресурс]: <http://www.processes.ihbt.ifmo.ru>
2. Рогов И. А., Некрутман С. В. Сверхвысокочастотный и инфракрасный нагрев пищевых продуктов. - М.: Пищевая пром-сть, 1976. - 210 с.
3. Лыков А.В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. - М.- Л.: Госэнергоиздат, 1963. - 536 с.
4. Рогов И. А., Некрутман С. В., Лысов Г. В. Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов. - М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1981. - 200 с.
5. Белобородов В.В., Вороненко Б.А. Решение задачи нагрева тел в электромагнитном поле сверхвысоких частот. // ЖПХ, «Наука» - Ленинградское отделение, № 10, 1984. - С. 2276 — 2282.