

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-1-18-24>

УДК 631.4: 631.344.8:631.67:536.2



РЕШЕНИЕ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА МЕТОДОМ КОНЕЧНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ УСЛОВИЙ ЛУЧИСТОГО ОБОГРЕВА ПОЧВЫ

М.В. Павлов[✉], Д.Ф. Карпов

Вологодский государственный университет; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, Россия

Аннотация. Цель исследований – нахождение, прогнозирование и регулирование температурно-влажностного режима почвы для условий лучистого отопления культивационных сооружений с применением потолочных инфракрасных излучателей темного типа. В работе без промежуточных математических преобразований представлена общепринятая система дифференциальных уравнений (как в размерном, так и в безразмерном видах), учитывающая основные и перекрестные процессы тепломассопереноса в дисперсных средах. Для данной системы уравнений рассмотрено частное аналитическое решение, которое учитывает не только основные, происходящие независимо друг от друга явления тепломассопереноса, но и влияние переноса водяных паров на формирование температурного поля слоя почвы. На примере фрезерного торфа представлены результаты решения данной задачи в виде одномерных нестационарных полей температуры и влагосодержания. С учетом заданных условий однозначности (геометрических, физических, начальных и граничных условий) установлено, что достижение требуемых значений влагосодержания и температуры произойдет через 6 ч. При этом изменение влагосодержания практически отсутствует в течение рассматриваемого периода на координатном отрезке $z \in [0; 6, 0]$ см. Решение математической задачи, реализованное в программной среде, позволяет контролировать тепловой и влажностный режимы почвы путем регулирования теплового потока на ее поверхности (в случае очевидной зависимости между величиной теплового потока и интенсивностью испарения с поверхности почвы). В силу того, что предложенное в статье решение является частным и не учитывает термодиффузию в слое почвы, то есть влияние разности температур на перенос влаги, представляется целесообразным и имеет научный интерес рассмотрение в дальнейшем общего решения системы дифференциальных уравнений взаимосвязанного тепломассопереноса.

Ключевые слова: температурно-влажностный режим, тепломассоперенос, метод конечного интегрального преобразования Фурье, коллоидное капиллярно-пористое тело, лучистый обогрев, культивационное сооружение, теплица, почва, фрезерный торф

Формат цитирования: Павлов М.В., Карпов Д.Ф. Решение краевой задачи тепломассопереноса методом конечного интегрального преобразования Фурье для условий лучистого обогрева почвы // Природообустройство. 2024. № 1. С. 18-24. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-1-18-24>

Original article

SOLUTION OF THE BOUNDARY VALUE PROBLEM OF HEAT AND MASS TRANSFER USING THE FOURIER METHOD OF FINITE INTEGRAL TRANSFORM FOR RADIANT SOIL HEATING CONDITIONS

M.V. Pavlov[✉], D.F. Karpov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vologda State University", 15 Lenin St., Vologda, 160000, Russia

Abstract. The purpose of the research is to find, predict and regulate the temperature and humidity regime of the soil for the conditions of radiant heating of cultivation facilities using dark-type ceiling infrared radiators. In the work, without intermediate mathematical transformations, a generally accepted system of differential equations (both in dimensional and dimensionless forms) is presented, taking into account the main and cross processes of heat and mass transfer in dispersed media. For this system of equations, a particular analytical solution is considered, which takes into account not only the main phenomena of heat and mass transfer that occur independently of each other, but also the effect of water vapor transfer on the formation of the temperature field of the soil layer. Using the example of milling

peat, the results of solving this problem are presented in the form of one-dimensional unsteady fields of temperature and moisture content. Taking into account the given unambiguity conditions (geometric, physical, initial and boundary conditions), it is established that the required values of moisture content and temperature will be reached in six hours. At the same time, there is practically no change in moisture content during the time period under consideration on the coordinate segment $z \in [0; 6, 0]$ sm. The solution of the mathematical problem, implemented in a software environment, allows you to control the thermal and humidity conditions of the soil by regulating the heat flow on its surface (in the case of an obvious relationship between the magnitude of the heat flux and the intensity of evaporation from the soil surface). Due to the fact that the solution proposed in the article is a particular one and does not take into account thermal diffusion in the soil layer, i.e. the influence of temperature differences on moisture transfer seems appropriate and of scientific interest to consider further the general solution of the system of differential equations of interrelated heat and mass transfer.

Keywords: temperature and humidity conditions, heat and mass transfer, Fourier transform method, colloidal capillary-porous body, radiant heating, cultivation structure, greenhouse, soil, milling peat

Format of citation: Pavlov M.V., Karpov D.F. Solution of the boundary value problem of heat and mass transfer using the Fourier method of finite integral transform for radiant soil heating conditions // Prirodoobustrojstvo. 2024. No 1. P. 18-24. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-1-18-24>

Введение. Изучение тепловых и массообменных процессов, происходящих в культивационных сооружениях, возможно на различных иерархических уровнях. С одной стороны, при разработке программных методов и инженерных методик проектирования и расчета систем отопления следует рассматривать тепловые и материальные балансы самого помещения, где выращиваются сельскохозяйственные культуры (томаты, огурцы и др.), его ограждения и поверхности почвы (интегральный подход) [1]. При этом необходимо учитывать взаимосвязь потоков теплоты и массы, а также их влияние на параметры микроклимата внутри помещения: температуру и относительную влажность внутреннего воздуха, температуру поверхности почвы. С другой стороны, представляет интерес дифференциальный подход, при котором теплообмен детально исследуется не во всей теплице, а в рамках ее отдельно взятого элемента [2]. С точки зрения благоприятного роста, развития и плодоношения растений очевидно, что таким элементом является почва, где искомыми величинами могут служить влагосодержание и температура слоя, изменяющиеся во времени.

Как известно, исследование многочисленных теплообменных процессов, происходящих в физическом теле, связано с решением задач молекулярного переноса энергии и вещества, которые обычно подчиняются линейному закону (например, перенос теплоты теплопроводностью описывается линейным законом Фурье). При этом рассматриваемые линейные законы положены в основу вывода соответствующих дифференциальных уравнений. Решение данных уравнений при определенных начальных

и граничных условиях, характеризующих начальное состояние тела и взаимодействие поверхности тела с окружающей средой, представляет известные математические трудности [3].

С конца XVIII в. до настоящего времени разрабатываются различные методы решения дифференциальных уравнений. В ходе развития экспериментальных методов установлена непосредственная связь между процессами переноса энергии и вещества (например, перенос теплоты теплопроводностью вызывает перенос вещества – термодиффузию, эффект Соре) [4]. Последнее характерно и для почвы, представляющей собой коллоидное капиллярно-пористое тело, в условиях инфракрасного обогрева [5].

Цель исследований: нахождение, прогнозирование и регулирование температурно-влажностного режима почвы для условий лучистого отопления культивационных сооружений с применением потолочных инфракрасных излучателей темного типа.

Материалы и методы исследований. Для решения многих задач теплообмена применяются не только классические методы (как, например, метод источников для полуограниченной области), но и методы интегральных преобразований, которые позволяют свести дифференциальные уравнения к системе алгебраических выражений. При этом математические операции производятся не над самой функцией («оригиналом»), а над ее видоизмененным аналогом («изображением»). Данный подход с учетом постановки задачи и определенных граничных условий позволяет избежать сложных математических преобразований и перейти от нескольких взаимосвязанных дифференциальных

уравнений к одному обыкновенному дифференциальному уравнению [6]. Кроме того, рассмотренный ранее [7] метод источников является ограниченным в использовании и может применяться только для предварительных расчетов, так как исключает учет очевидной взаимосвязи между тепловыми и массообменными процессами, происходящими в слое почвы (так называемые перекрестные явления теплопереноса в дисперсных средах).

Методы конечных интегральных преобразований имеют ряд известных неоспоримых преимуществ в сравнении с другими математическими методами [8]:

1. позволяют свести сложные математические задачи (особенно при решении системы взаимосвязанных дифференциальных уравнений) к менее сложным (алгебраическим уравнениям). Как отмечено выше, в основе метода интегральных преобразований лежит переход от оригинала функции, представляющего собой систему дифференциальных уравнений в частных производных, к изображению, выраженному в виде обыкновенного дифференциального уравнения;

2. позволяют получать решения в явном виде, что крайне важно при выполнении программных вычислений.

В операционном исчислении существуют методы преобразования Лапласа, Фурье и Ханкеля [9]. Комплексное интегральное преобразование Фурье удобно применять для тел неограниченной протяженности. Рассмотрим его применение для решения краевой задачи теплопереноса для условий лучистого обогрева почвы.

Взаимосвязанные процессы теплопереноса в дисперсных средах при условии постоянства физических свойств вещества принято описывать следующими уравнениями в частных производных (математический вывод данных уравнений представлен в работе [10]):

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = a_w \nabla^2 W + a_w \delta \nabla^2 t; \quad (1)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_t \nabla^2 t + \frac{r \varepsilon}{c_m} \frac{\partial W}{\partial \tau}, \quad (2)$$

где W – влагосодержание, кг / кг; t – температура, °C; τ – время, с; a_w – коэффициент диффузии, м² / с; δ – термоградиентный коэффициент (коэффициент Сорэ), 1/°C; a_t – коэффициент температуропроводности, м² / с; r – удельная теплота парообразования, Дж / кг; ε – критерий фазового превращения; c_m – удельная массовая теплоемкость, Дж / (кг · К).

Система дифференциальных уравнений (1) и (2) является общепринятым математическим выражением взаимосвязанных процессов теплопереноса в дисперсных средах, к которым

также можно отнести и слой почвы. Формула (1) учитывает не только диффузию влаги, вызванную градиентом влагосодержания W в двух различных координатах (закон Фика), но и влияние разности температур на перемещение влаги (термодиффузия, эффект Сорэ). В свою очередь, в формулу (2) входит не только дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье, но и слабое, отвечающее за пародиффузионные процессы (вместе с капиллярным переносом водяных паров и их последующей конденсацией за счет скрытой теплоты парообразования происходит местный нагрев слоя почвы).

С целью обобщения результатов экспериментальной работы и универсализации полученных расчетных значений дифференциальные уравнения (1) и (2) могут быть записаны в безразмерном виде с использованием соответствующих чисел (критериев) подобия (математический вывод данных уравнений представлен в работе [10]):

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo_w} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + Pn \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial Fo_t} = \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + Ko^* Lu \frac{\partial \theta}{\partial Fo_w}, \quad (4)$$

где $\theta = \frac{W_n - W}{W_n - W_k}$ – безразмерное влагосодержание; W_n и W_k – начальное и конечное влагосодержание почвы соответственно, кг / кг; $T = \frac{t - t_n}{t_k - t_n}$ – безразмерная температура; t_n

и t_k – начальная и конечная температура почвы соответственно, °C; $Fo_w = \frac{a_w \tau}{h^2}$ – массообменное число Фурье;

$Fo_t = \frac{a_t \tau}{h^2}$ – теплообменное число Фурье; h – толщина (глубина) слоя почвы, м; $\xi = \frac{z}{h}$ – безразмерная координата;

$Pn = \frac{\delta(t_k - t_n)}{W_n - W_k}$ – число Поснова; $Ko^* = \varepsilon Ko$ – модифицированное число Коссовича; $Ko = \frac{r(W_n - W_k)}{c_m(t_k - t_n)}$ – число Коссовича; $Lu = \frac{a_w}{a_t}$ – число Льюкова (Льюиса).

$Ko = \frac{r(W_n - W_k)}{c_m(t_k - t_n)}$ – число Коссовича; $Lu = \frac{a_w}{a_t}$ – число Льюкова (Льюиса).

$Lu = \frac{a_w}{a_t}$ – число Льюкова (Льюиса).

Результаты и их обсуждение. Пусть существует слой почвы неограниченных размеров по координатным осям Ox и Oy (рис. 1), имеющий характерный линейный размер относительно оси Oz – толщину h , м. Начальное влагосодержание слоя почвы (в момент времени $\tau = 0$) равнозначно на координатном отрезке $z \in [0; h]$, м, и составляет W_n , кг / кг. Под воздействием испарительных процессов с поверхности почвы в окружающую среду интенсивностью i , кг / (м² · с), происходит изменение влагосодержания почвы по координате Oz в течение времени τ , с. Определить изменение влагосодержания слоя почвы вида $W(z, \tau)$.

Интенсивность испарительных процессов с поверхности почвы может быть определена согласно данным рисунка 1 по уравнению массоотдачи [11]:

$$i = \beta(p_n - p_c), \text{ кг / (м}^2 \cdot \text{с)}, \quad (5)$$

где β – коэффициент массоотдачи, $\text{кг / (Н} \cdot \text{с)}$, который рассчитывается через критериальные уравнения подобия массообменных процессов либо приближенно вычисляется по формуле Льюиса [12]; p_n и p_c – соответственно парциальное давление водяного пара на поверхности почвы и вдали от нее (в окружающей среде), Н / м^2 .

Рассмотрим решение задачи нестационарного массообмена без учета термодиффузии влаги, которая возникает в результате разности температур в двух различных точках дисперсной среды. Как отмечено [13], для ряда режимов нестационарного процесса тепло- и массопереноса эффект Соре весьма незначителен, так что вторым членом правой части уравнения (1) в некоторых случаях можно пренебречь.

Таким образом, условия однозначности для решения задачи массопереноса в слое почвы будут иметь вид:

$$\frac{\partial W(z, \tau)}{\partial \tau} = a_w \frac{\partial^2 W(z, \tau)}{\partial z^2} \quad (\tau > 0; 0 \leq z \leq h); \quad (6)$$

$$W(z, 0) = W_n; \quad (7)$$

$$a_w \rho \frac{\partial W(h, \tau)}{\partial z} + i = 0; \quad (8)$$

$$W(0, \tau) = W_n, \quad \frac{\partial W(0, \tau)}{\partial z} = 0, \quad (9)$$

где ρ – плотность скелета почвы, кг / м^3 .

Решение дифференциального уравнения (6) при начальных (7) и граничных (8), (9) условиях известно и имеет вид [12]:

$$W(z, \tau) = W_n - \frac{ih}{a_w \rho} \left[Fo_w - \frac{1}{6} \left(1 - 3 \frac{z^2}{h^2} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{n^2 \pi^2} \cos \left(n \pi \frac{z}{h} \right) e^{-n^2 \pi^2 Fo_w} + \frac{2W_n}{h^2} \sum_{n=1}^{\infty} \cos \left(n \pi \frac{z}{h} \right) e^{-n^2 \pi^2 Fo_w} \cdot \int_0^h \cos \left(n \pi \frac{z}{h} \right) dz \right]; \quad (10)$$

$$\theta = \frac{W_n - W(z, \tau)}{W_n - W_k} = Ki_w \left[Fo_w - \frac{1}{6} \left(1 - 3 \xi^2 \right) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{n^2 \pi^2} \cos \left(n \pi \xi \right) e^{-n^2 \pi^2 Fo_w} \right], \quad (11)$$

где $Ki_w = \frac{ih}{a_w \rho (W_n - W_k)}$ – массообменный критерий Кирпичева.

На рисунке 2 представлено решение краевой задачи нестационарного массообмена

на примере фрезерного торфа со следующими известными параметрами: $h = 0,12 \text{ м}$; $\rho = 74 \text{ кг / м}^3$; $a_w = 2,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 / \text{с}$; $W_n = 3,7 \text{ кг / кг}$; $W_k = 1,0 \text{ кг / кг}$; $i = 170 \cdot 10^{-6} \text{ кг / (м}^2 \cdot \text{с)}$.

Пусть существует слой почвы неограниченных размеров по координатным осям Ox и Oy (рис. 3), имеющий характерный линейный размер относительно оси Oz – толщину h , м. Начальная температура слоя почвы (в момент времени $\tau = 0$) равнозначна на координатном отрезке $z \in [0; h]$, м, и составляет t_n , °С. Под воздействием лучистого потока плотностью q , Вт / м^2 , происходит изменение температуры почвы по координате Oz в течение времени τ , с. Влияние на температурное поле слоя почвы также

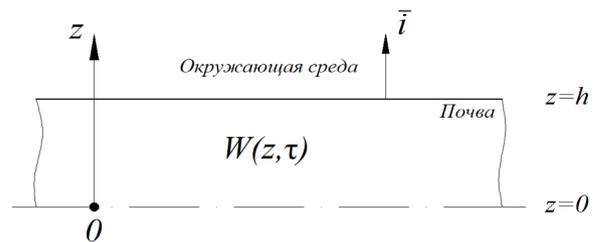


Рис. 1. Постановка краевой задачи массопереноса

Fig. 1. Formulation of the boundary value problem of mass transfer

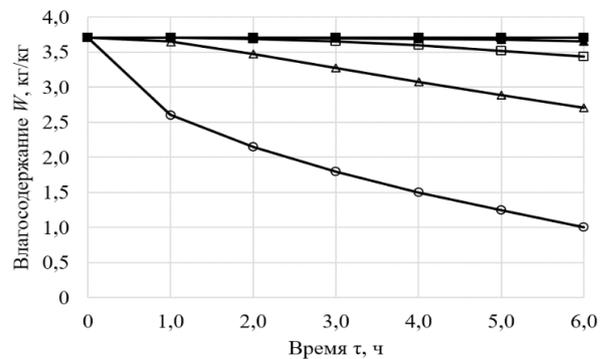


Рис. 2. Решение краевой задачи массопереноса:

■ – 0 см; ▲ – 6 см; □ – 8 см; △ – 10 см; ○ – 12 см
Fig. 2. Solution mass transfer boundary:
■ – 0 см; ▲ – 6 см; □ – 8 см; △ – 10 см; ○ – 12 см



Рис. 3. Постановка краевой задачи теплопереноса

Fig. 3. Formulation of the boundary value problem of heat transfer

оказывает перемещение водяных паров, вызванное градиентом влагосодержания. Определить изменение температуры слоя почвы вида $t(z, \tau)$.

Часть теплового потока от инфракрасного излучателя, влияющая на изменение температурного поля почвы, рассчитывается через уравнение теплового баланса ее поверхности [13]:

$$q = \left(1 - \frac{A}{100}\right) q_{inf} - q_{vp} - q_{conv}, \text{ Вт / м}^2, \quad (12)$$

где A – альbedo деятельной поверхности почвы, %; q_{inf} – плотность теплового потока от источника инфракрасного излучения, Вт / м^2 ; q_{vp} – плотность теплового потока, расходуемая на испарение влаги с поверхности почвы (прямо пропорциональна интенсивности испарения влаги с поверхности почвы i), Вт / м^2 ; q_{conv} – плотность теплового потока в результате конвективного теплообмена между поверхностью почвы и окружающей средой, Вт / м^2 , определяемая по уравнению Ньютона.

Условия однозначности для постановки краевой задачи нестационарного теплообмена, которые учитывают изменение температурного поля почвы за счет как внешнего теплового воздействия, так и внутренних пародиффузионных процессов, будут иметь вид:

$$\frac{\partial t(z, \tau)}{\partial \tau} = a_t \frac{\partial^2 t(z, \tau)}{\partial z^2} + \frac{r\varepsilon}{c_m} \frac{\partial W}{\partial \tau} \quad (\tau > 0; 0 \leq z \leq h); \quad (13)$$

$$t(z, 0) = t_{\text{н}}; \quad (14)$$

$$\lambda \frac{\partial t(h, \tau)}{\partial z} + q = 0; \quad (15)$$

$$t(0, \tau) = t_{\text{н}}, \quad \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial z} = 0, \quad (16)$$

где λ – коэффициент теплопроводности почвы, $\text{Вт / (м} \cdot \text{К)}$.

Решение дифференциального уравнения (13) при начальных (14) и граничных (15), (16) условиях известно и имеет вид [12]:

$$\begin{aligned} t(z, \tau) = & t_{\text{н}} + \frac{qh}{\lambda} \left[Fo_t - \frac{1}{6} \left(1 - 3 \frac{z^2}{h^2}\right) + \right. \\ & \left. + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{n^2 \pi^2} \cos\left(n\pi \frac{z}{h}\right) e^{-n^2 \pi^2 Fo_t} + \right. \\ & \left. + \frac{2t_{\text{н}} \lambda}{qh^2} \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(n\pi \frac{z}{h}\right) e^{-n^2 \pi^2 Fo_t} \cdot \int_0^h \cos\left(n\pi \frac{z}{h}\right) dz \right] + \\ & + \frac{r\varepsilon}{c_m} \frac{Lu}{Lu-1} \frac{ih}{a_{\text{w}} \rho} \left\{ Fo_t - Fo_{\text{w}} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{n^2 \pi^2} \cos\left(n\pi \frac{z}{h}\right) \times \right. \\ & \left. \times \left[e^{-n^2 \pi^2 Fo_t} - e^{-n^2 \pi^2 Fo_{\text{w}}} \right] - \frac{2W_{\text{н}} a_{\text{w}} \rho}{ih^2} \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(n\pi \frac{z}{h}\right) \times \right. \\ & \left. \times \left[e^{-n^2 \pi^2 Fo_t} - e^{-n^2 \pi^2 Fo_{\text{w}}} \right] \cdot \int_0^h \cos\left(n\pi \frac{z}{h}\right) dz \right\}; \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T = \frac{t(z, \tau) - t_{\text{н}}}{t_{\text{к}} - t_{\text{н}}} = & Ki_t \left[Fo_t - \frac{1}{6} (1 - 3\xi^2) + \right. \\ & \left. + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{n^2 \pi^2} \cos(n\pi \xi) e^{-n^2 \pi^2 Fo_t} \right] + \\ & + \frac{Ko^* Ki_{\text{w}} Lu}{Lu-1} \left\{ Fo_t - Fo_{\text{w}} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{n^2 \pi^2} \cos(n\pi \xi) \times \right. \\ & \left. \times \left[e^{-n^2 \pi^2 Fo_t} - e^{-n^2 \pi^2 Fo_{\text{w}}} \right] \right\}, \quad (18) \end{aligned}$$

где $Ki_t = \frac{qh}{\lambda(t_{\text{к}} - t_{\text{н}})}$ – теплообменный критерий Кирпичева.

На рисунке 4 представлено решение краевой задачи нестационарного теплообмена на примере фрезерного торфа со следующими известными параметрами: $h = 0,12 \text{ м}$; $\rho = 74 \text{ кг / м}^3$; $a_t = 14,84 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 / \text{с}$; $\lambda = 0,302 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$; $c_m = 2,75 \cdot 10^4 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{К)}$; $r = 2,472 \cdot 10^6 \text{ Дж / кг}$; $\varepsilon = 0,1$; $t_{\text{н}} = 5^\circ\text{C}$; $t_{\text{к}} = 20^\circ\text{C}$; $q = 100 \text{ Вт / м}^2$.

На основе аналитического решения краевой задачи тепломассопереноса в размерном (10), (17) и безразмерном (11), (18) видах разработана программа для определения влажностного и температурного полей дисперсной среды по пространственно-временным координатам в математическом редакторе *Mathcad*.

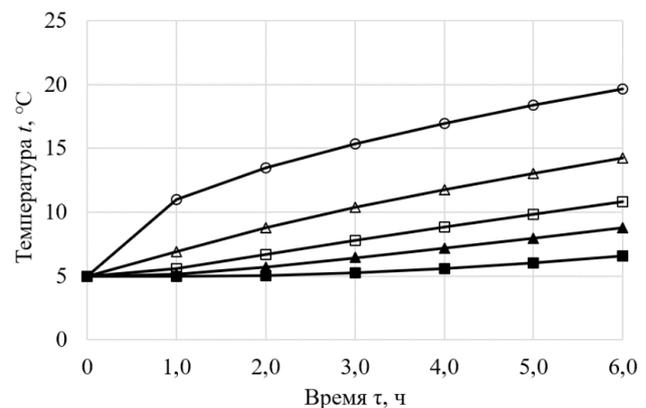


Рис. 4. Решение краевой задачи теплопереноса:

■ – 0 см; ▲ – 6 см; □ – 8 см; △ – 10 см; ○ – 12 см

Fig. 4. Solution of the boundary value problem of heat transfer:

■ – 0 cm; ▲ – 6 cm; □ – 8 cm; △ – 10 cm; ○ – 12 cm

Выводы

Метод конечного интегрального преобразования Фурье, как и подобные аналитические методы решения задач нестационарного теплообмена, позволяет получать точные решения в виде алгебраических функций, которые без особых технических трудностей интегрируются в соответствующие проблемно-ориентированные программные продукты.

Кроме того, появляется возможность прогнозирования температурно-влажностного режима почвы по глубине ее залегания в течение определенного времени. Результаты программного решения краевой задачи тепломассопереноса методом конечного интегрального преобразования Фурье показали, что слой почвы толщиной $h = 0,12$ м достигнет конечных значений влагосодержания и температуры за 6 ч. При этом изменение влагосодержания практически отсутствует в течение рассматриваемого периода на координатном отрезке $z \in [0; 6,0]$ см. Очевидно, что регулируя мощность инфракрасного излучения, можно добиться требуемого периода нагрева и сушки почвы с целью достижения соответствующих значений температуры и влагосодержания. При решении термической задачи учтено влияние переноса водяного пара в слое почвы на ее тепловой режим (в рассматриваемом примере поток водяного пара принят равным 10% от общего потока переносимой влаги).

В статье [7], посвященной решению краевой задачи тепломассопереноса методом источников, рассмотрены только основные явления,

влияющие на перенос энергии и вещества в дисперсной среде (например, массоперенос за счет разности влагосодержаний в двух координатах слоя почвы). Следовательно, данная задача вовсе не учитывала перекрестные явления, и дифференциальные уравнения решались независимо друг от друга, так как не имели функциональной связи. Метод конечного интегрального преобразования Фурье, представленный в данной работе, можно считать более совершенным подходом в решении сопряженной задачи тепломассообмена, поскольку он учитывает, кроме основных независимых друг от друга явлений, пародиффузионный процесс, вызванный переносом энергии водяного пара при его перемещении.

Таким образом, остается открытым вопрос решения краевой задачи, которая охватывала бы всю систему дифференциальных уравнений (1) и (2), не исключая какие-либо входящие в него слагаемые. Данным решением может стать метод (который в дальнейшем будет рассмотрен авторами) совместного применения интегрального преобразования Лапласа и вариационного метода Бубнова-Галеркина.

Список использованных источников

1. **Pichev V.Yu.** Development of procedure for determination of characteristics of heated polycarbonate greenhouses // *International Research Journal*. 2021. № 2 (104). Pp. 132-135. DOI: 10.23670/IRJ.2021.103.2.025.
2. **Кабалоев Т.Х.**, Температурное поле тепличной почвы при термоэлектрическом способе нагрева / Гатуева К.К., Гокоев Т.М., Никколова Л.С. // *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2018. Т. 55, № 4. С. 148-152.
3. **Махмаёров Б., Самаров Ш.** Температурные поля в почвах при различных режимах воздуха в теплицах // *Вестник Таджикского национального университета*. 2017. № 1. С. 145-149.
4. **Барановский Н.В.** Экспериментальное исследование режимов теплового воздействия на слой почвы при инертном прогреве / Максимов В.И., Разва А.С., Базаров А.В. // *Инженерно-физический журнал*. 2020. Т. 93, № 6. С. 1455-1460.
5. **Дородов П.В.** Применение инфракрасного нагрева при обеззараживании почвы в защищенном грунте и механизм распространения тепла / Пospelова И.Г., Возмищев И.В., Титов И.В. // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2022. Т. 69, № 2 (47). С. 59-64.
6. **Туголуков Е.Н.** Решение задач теплопроводности методом конечных интегральных преобразований: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамбовского университета, 2005. 116 с.
7. **Павлов М.В., Карпов Д.Ф.** Решение краевой задачи тепломассопереноса методом источников для условий лучистого обогрева почвы // *Природообустройство*. 2023. № 4. С. 15-20.
8. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.

References

1. **Pichev V.Yu.** Development of procedure for determination of characteristics of heated polycarbonate greenhouses // *International Research Journal*. 2021.No. 2 (104). Pp. 132-135. – DOI: 10.23670/IRJ.2021.103.2.025.
2. **Kabaloev T.H.**, The temperature field of greenhouse soil with a thermoelectric heating method / Gatuева K.K., Gokoyev T.M., Nikkolova L.S. // *Izvestiya Gorsky State Agrarian University*. 2018. Vol. 55, No. 4. pp. 148-152.
3. **Mahmayorov B., Samarov Sh.** Temperature fields in soils under different air regimes v greenhouses // *Vestnik of the Tadzhiick national University*. 2017. № 1. P. 145-149.
4. **Baranovskij N.V., Maksimov V.I., Razva A.S., Bazarov A.V.** Experimental study of thermal impact regimes on the soil layer at inert warming // *Engineering-physics journal*. 2020. Vol. 93, No. 6. P. 1455-1460.
5. **Dorodov P.V., Pospelova I.G., Vozmishchev I.V., Titov I.V.** Application of infrared heating in soil disinfection in protected soil and the mechanism of heat propagation. // *Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex*. 2022. Vol. 69, No. 2 (47). P. 59-64.
6. **Tugolukov E.N.** Solution of thermal conductivity problems by the method of finite integral transformations: Textbook. Tambov: Tambov University Publishing house, 2005. 116 p.
7. **Pavlov M.V., Karpov D.F.** The solution of the boundary value problem of heat and mass transfer by the method of sources for conditions of radiant heating of the soil // *Prirodoobustrojstvo*, 2023. No. 4. pp. 15-20.
8. **Lykov A.V.** Theory of thermal conductivity: textbook for universities. Moscow: Higher School, 1967. 600 p
9. **Pavlov M.V.** Investigation of heat and mass transfer processes in the soil layer on the example of milling peat

9. Павлов М.В. Исследование процессов тепло-массопереноса в слое почвы на примере фрезерного торфа при инфракрасно-лучистом обогреве: учебное пособие / Карпов Д.Ф., Сеницын А.А. и др. . Вологда: ВоГУ, 2015. 192 с.

10. Лыков А.В. Теория сушки: учеб. пособие для вузов. М.: Энергия, 1968. 472 с.

11. Куртнер Д.А., Усков И.Б. Климатические факторы и тепловой режим в открытом защищенном грунте. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 232 с.

12. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория переноса энергии и вещества. Минск: Изд-во АН БССР, 1963. 332 с.

13. Ковда В.А. Основы учения о почвах. Общая теория почвообразовательного процесса: В 2 т. Т. 1. М.: Наука, 1973. 456 с.

with infrared radiant heating: textbook / Karpov D.F., Sinityn A.A. et al. Vologda: Vogtu, 2015. 192 p.

10. Lykov A.V. Theory of drying: textbook. manual for higher education institutions. M.: Energiya, 1968. 472 p.

11. Kurtener D.A., Uskov I.B. Climatic factors and thermal conditions in open protected ground. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982. 232 p.

12. Lykov A.V., Mihajlov Yu.A. Theory of energy and matter transfer. Minsk: Izd-vo AN BSSR, 1963. 332 p.

13. Kovda V.A. Fundamentals of the doctrine of soils. General theory of soil-forming process: In 2 vols. Vol. 1. Moscow, Nauka Publ., 1973. 456 p.

Об авторах

Михаил Васильевич Павлов, доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры теплогазоводоснабжения; Author ID SCOPUS: 57204361039; WoS ResearcherID AAN-5773-2021; ORCID: 0000-0002-8687-3296; ID РИНЦ 564419; pavlovmv@vogu35.ru

Денис Федорович Карпов, старший преподаватель кафедры теплогазоводоснабжения; Scopus ID: 57210325021; WoS Researcher ID: AAF-2092-2021 ORCID: 0000-0002-3522-9302; karpovdf@vogu35.ru

Author information

Mikhail V. Pavlov, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply; Author ID SCOPUS: 57204361039; WoS ResearcherID AAN-5773-2021; ORCID: 0000-0002-8687-3296; ID РИНЦ 564419; pavlovmv@vogu35.ru

Denis F. Karpov, Senior Lecturer at the Department of Heat and Gas Supply; Scopus ID: 57210325021; WoS Researcher ID: AAF-2092-2021 ORCID: 0000-0002-3522-9302; karpovdf@vogu35.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Павлов М.В., Карпов Д.Ф. провели теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых выполнили обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов / The authors declare that there are no conflicts of interest

Вклад авторов / Contribution of authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации. / All authors made an equal contribution to the preparation of the publication.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 20.06.2023

Поступила после рецензирования / Received after peer review 18.10.2023

Принята к публикации / Accepted for publication 18.10.2023

Pavlov M.V. and Karpov D.F. conducted theoretical and experimental studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism.